

超强激光超热电子激发的 $K\alpha$ X 射线发射研究^{*}

黄文忠^{1)†} 李玉同²⁾ 熊 勇¹⁾ 张双根¹⁾ 温贤伦¹⁾ 洪 伟¹⁾ 谷渝秋¹⁾ 温天舒¹⁾ 何颖玲¹⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

(2006 年 11 月 27 日收到, 2007 年 4 月 6 日收到修改稿)

建立了无色散型 X 射线谱仪. 利用 SILEX-I 激光装置的超强激光辐照固体物质, 分别在靶前、后定量测量了 Cu 和 Mo 物质在不同激光功率密度时的 X 射线谱和 $K\alpha$ 光子产额, 推导了不同激光强度时的 $K\alpha$ X 射线光子转换效率. 实验发现, 打靶激光能量越高, 靶后出射的 $K\alpha$ 产额越高, 100 μm Mo 靶可获得 10^{-5} 量级转换效率.

关键词: X 射线发射, 激光-物质相互作用, $K\alpha$ 谱仪

PACC: 3220R, 5250J, 0785

1. 引 言

飞秒激光辐照固体物质, 由于集体吸收机理在物质临界面附近产生大量超热电子^[1-3], 超热电子成准麦克斯韦能量分布, 在传播过程中, 产生渡越辐射和韧致辐射^[4,5], 特别是当其能量大于传播物质 K 壳层的电离能时产生 $K\alpha$ 特征 X 射线. 这种 $K\alpha$ X 射线源是准单色源, 其能量取决于所选择的物质, 具有脉宽窄、源尺度小等特点, 在物质的动态探测和医学成像方面有着极大的应用价值^[6-9]. 由于激光强度越高, 产生的超热电子能量越高, 而高能超热电子将在靶的较深处产生 $K\alpha$ 光子, $K\alpha$ 光子在靶物质中传播时会被再吸收. Reich 等人^[10]研究了 $K\alpha$ 光子产额和激光强度及靶物质的关系, 发现当靶物质一定时, 只有某一激光强度才能获得最大的 $K\alpha$ 光子产额, 其最佳激光强度 $I_{\text{opt}} = 7 \times 10^9 Z^{4.4}$. Salzmann 和 Reich 等人建立了激光辐照箔靶 $K\alpha$ X 射线发射的解析模型^[11], 研究了电子阻止范围、靶厚度和光子平均自由程间的相互影响, 其结果与文献 [10] 一致. Chen 发现当打靶激光对比度较低时, $K\alpha$ X 射线饱和和转换效率对应的激光强度远较文献 [9] 的高^[12]. 若干小组也已报道了他们进行的 $K\alpha$ X 射线发射实验^[13-19]. 但他们研究的驱动激光能量只有几百毫

焦甚至几十毫焦, 测量基本都在靶前进行. 靶前出射的 X 射线除了 $K\alpha$ X 射线外, 还存在大量的离子自发辐射, 而靶后出射的 X 射线由于靶物质自身发挥了 K 边滤光的作用, $K\alpha$ 光源单色性较靶前出射的好, 更适宜作为准单色光源.

本文建立了无色散型 X 射线谱仪, 利用 SILEX-I 激光装置^[20]的超强激光辐照固体物质, 分别在靶前、后定量测量了 Cu 和 Mo 物质在不同激光功率密度时的 X 射线谱和 $K\alpha$ 光子产额, 推导了不同激光强度时 $K\alpha$ 光子的转换效率, 发现高强度激光打靶时, 靶后出射的 $K\alpha$ 光源其单色性和强度均优于靶前出射的 $K\alpha$ 光源.

2. 无色散型 $K\alpha$ 特征线谱仪

无色散型 X 射线谱仪由单光子计数型 X 射线 CCD 组成, 能量范围 2 keV—30 keV^[21]. 当一个 X 射线光子在 CCD 硅晶层中被吸收时, 其能量主要经光电效应损耗, 产生电子-空穴对, 电子-空穴对数目正比于入射光子能量(约 3.65 eV 产生一个电子-空穴对). 每个像素中产生的电荷通过输出放大器放大后转换为数字信号.

在单光子计数型 CCD 响应的有效能区内, 对于各种放射源产生的单光子 X 射线, CCD 灵敏面上产

^{*} 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号 9140C6802020602)资助的课题.

[†] E-mail: h wz308@163.com

生的计数不相同,入射光子的能量越高,产生的计数越大,每 6.4 eV 能量产生一个计数.实验标定得到的谱仪探测效率见图 1,横坐标 E 表示以 keV 为单位的光子能量,纵坐标 η 为谱仪效率.

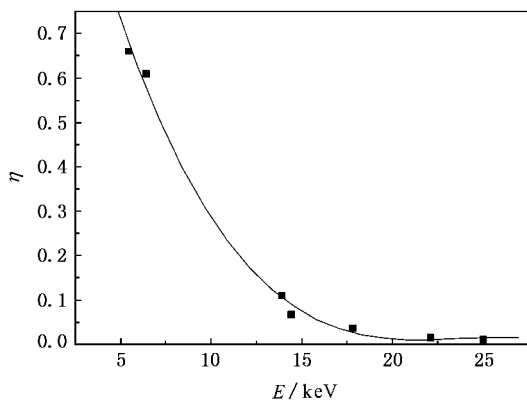


图 1 利用 ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{129}I , ^{241}Am 等放射源标定的谱仪效率

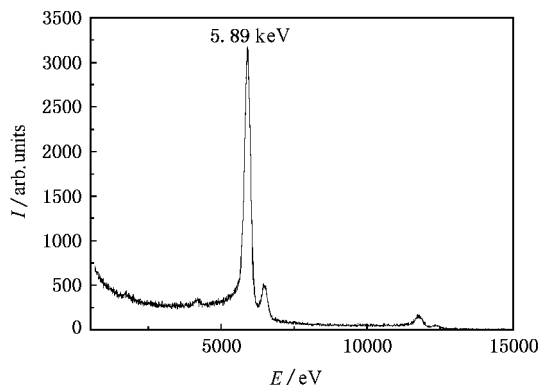


图 2 谱仪测得的 ^{55}Fe 放射源谱

图 2 和图 3 分别是谱仪测得的 ^{55}Fe 放射源谱和 Mo 荧光谱.

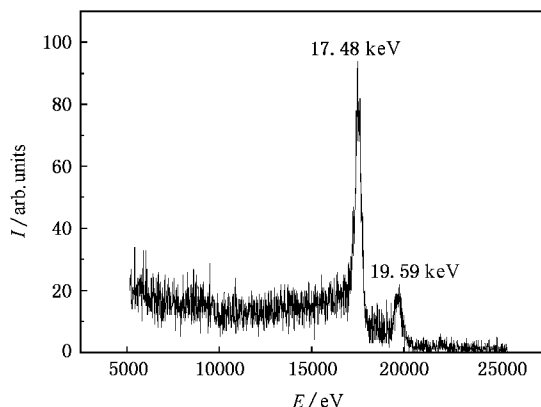


图 3 Mo 荧光谱,靶面激光能量 2.15 J

以谱线半高全宽(FWHM)作为谱仪分辨,测得的典型谱线 FWHM 见表 1.由于测量的 $K\alpha$ 谱不是单线,谱仪的能量分辨好于 $K\alpha$ 谱的 FWHM.

表 1 谱仪典型分辨

入射光子能量/keV	5.89	8.048	17.48
分辨(FWHM)/eV	< 240	< 350	< 470

3. $K\alpha$ X 射线测量

3.1. 实验设置

实验在中国工程物理研究院的 SILEX-I 激光装置上进行,布局见图 4. P 极化激光脉冲经由 $f/3$ 离轴抛物面镜聚焦在 Cu 或 Mo 膜靶上,其 $K\alpha$ 光子能量分别为 8048 eV 和 17480 eV.靶厚分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$.入射激光与靶法线成 23° ,脉宽 33 fs,能量 50 mJ—6 J.在主脉冲前 8 ns 有一幅度为主脉冲幅度 10^{-3} 或 10^{-5} 的预脉冲.激光焦斑直径约 $30\ \mu\text{m}$,用 X 射线针孔相机和长焦距显微镜监测.针孔相机放大 14 倍.用 16bit 光子计数 CCD 探测器组成无色散谱仪分别测量靶前、后出射的 X 射线强度.靶后测量时,探测器与靶背法向成 1° .靶前测量时,探测器与靶面法向成 1° .实验中,固定激光脉宽,激光焦斑尽量保持不变,改变激光能量以获得不同激光强度,靶面激光功率密度在 $10^{17}\ \text{W}/\text{cm}^2$ — $10^{19}\ \text{W}/\text{cm}^2$.

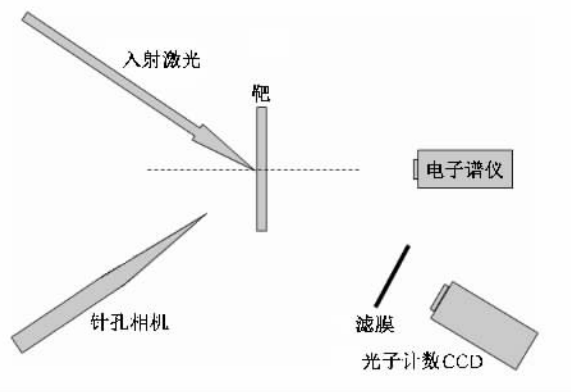


图 4 实验布局($K\alpha$ 谱仪;针孔相机;电子谱仪)

3.2. 结果和讨论

3.2.1. 靶前、后单色性比较

打靶能量越高,靶前、后出射的 $K\alpha$ X 射线强度越高,但当打靶激光大于 1 J 时,靶后发射的 $K\alpha$ X 射线强度随激光强度继续增加,而靶前发射的 $K\alpha$ X

射线强度却不随激光强度继续增加、只有韧致辐射谱强度增加。图 5 和图 6 分别是在靶前测得的第 508776[#] 发次和第 508780[#] 发次 X 射线谱图,前者打靶能量 660 mJ、后者打靶能量 2000 mJ。图 7 是在靶后测得的第 505188[#] 发次 X 射线谱图,打靶能量 3470 mJ。靶材料均为厚 50 μm 的 Cu 膜。图 5、图 6 和图 7 中,横坐标表示光子能量,纵坐标表示光子相对强度。图 5 谱图除了能量 8048 eV 的 Cu $K\alpha$ X 射线外,还存在其他的离子自发辐射。图 6 中, $K\alpha$ X 射线淹没在连续谱本底中。而图 7 中, $K\alpha$ X 射线强度远较其他 X 射线强度高,其单色性好于靶前。

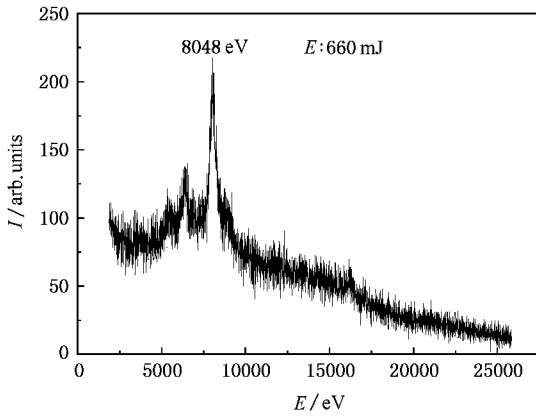


图 5 靶前发射的 X 射线光谱图,靶面激光能量 0.66 J

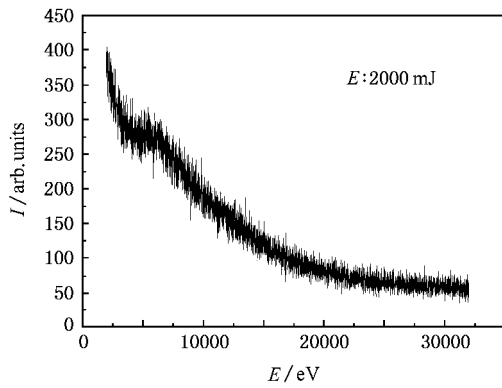


图 6 靶前发射的 X 射线光谱图,靶面激光能量 2 J

3.2.2. 靶后 $K\alpha$ X 射线强度随入射激光能量和靶厚变化

图 8 是用 ITS 程序计算的超热电子平均能量 500 keV 时,单位电子产生的 $K\alpha$ 光子份额随靶厚变化曲线,横坐标表示靶厚度,纵坐标为一个能量 400 keV 的电子在单位立体角内的 $K\alpha$ 光子转换份额。当靶厚 100 μm 时, $K\alpha$ 光子份额最高。图 9 是 Mo 靶厚 50 μm 和 100 μm 时, $K\alpha$ 光子产额随入射激光能量

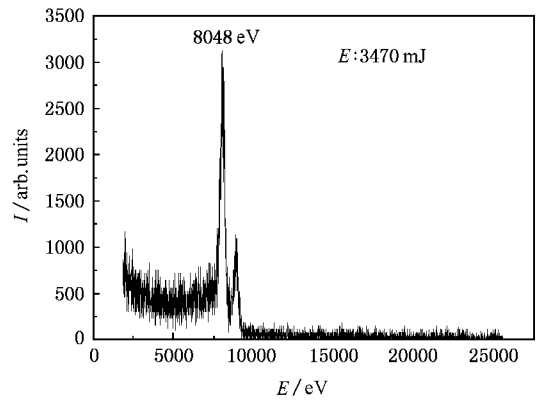


图 7 靶后发射的 X 射线光谱图,靶面激光能量 3.47 J

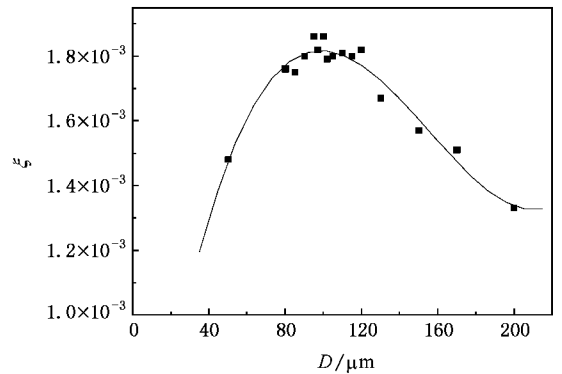


图 8 ITS 程序计算的一个能量 400 keV 电子在单位立体角内的 $K\alpha$ 光子转换份额随靶厚变化

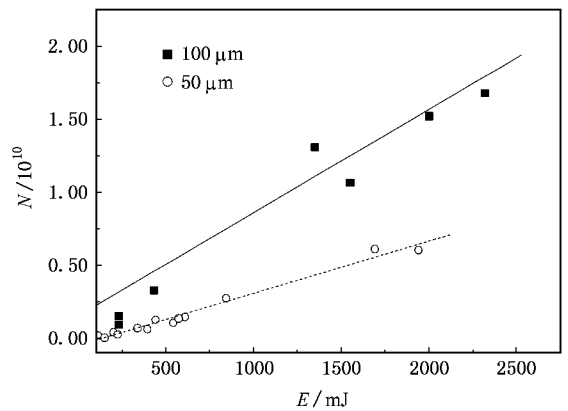


图 9 实验测量的靶厚分别为 100 μm 和 50 μm 时 $K\alpha$ 光子产额随能量变化曲线

变化曲线。横坐标表示打靶激光能量,纵坐标为 $K\alpha$ 光子产额。从图可以看出,入射激光能量越高, $K\alpha$ 光子强度越大,在所测量的能量范围内, $K\alpha$ 光子产额随能量近似线性增长,100 μm 靶获得的 $K\alpha$ 光子强度大于 50 μm 靶的 $K\alpha$ 光子强度。图 10 是 Mo 靶

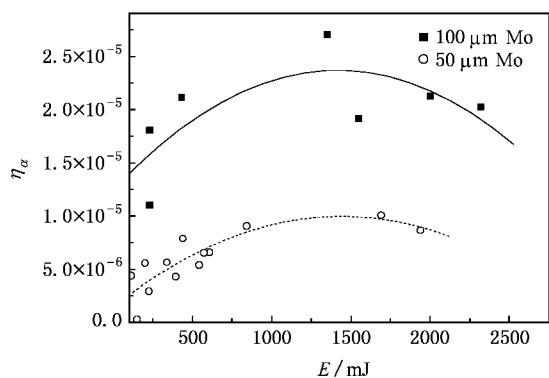


图 10 靶厚分别为 $100\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 时 $K\alpha$ 光子转换效率变化曲线

厚 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 时, $K\alpha$ 光子转换效率随入射激光能量变化曲线. 横坐标表示打靶激光能量, 纵坐标

为 $K\alpha$ 光子转换效率, $100\ \mu\text{m}$ 靶获得的 $K\alpha$ 光子转换效率大于 $50\ \mu\text{m}$ 靶的 $K\alpha$ 光子转换效率.

4. 结 论

超热电子激发的 $K\alpha$ 光源是准单色 X 射线源, 靶后单色性较靶前好. 打靶能量越高, $K\alpha$ 产额越高, 但当打靶激光达到一定强度时, 靶后发射的 $K\alpha$ X 射线强度随激光强度继续增加, 而靶前发射的 $K\alpha$ X 射线强度却不随激光强度继续增加, 只有韧致辐射谱强度增加. 高强度激光打靶时, 靶后出射的 $K\alpha$ X 射线源更适宜作为单色光源应用, 采用 $100\ \mu\text{m}$ Mo 靶可获得 10^{-5} 量级转换效率. 入射激光强度越高, 需要更厚的荧光层才能获得更强的 $K\alpha$ X 射线源.

- [1] Gu Y Q, Cai D F, Zheng Z J, Yang X D, Zhou W M, Jiao C Y, Chen H, Wen T S, Chunyu S T 2005 *Acta Phy. Sin.* **54** 186 (in Chinese)[谷渝秋、蔡达锋、郑志坚、杨向东、周维民、焦春晔、陈 豪、温天舒、淳于书泰 2005 物理学报 **54** 186]
- [2] Zheng Z Y, Li Y T, Yuan X H, Xu M H, Liang W X, Yu Q Z, Zhang Y, Wang Z H, Wei Z Y, Zhang J 2006 *Acta Phy. Sin.* **55** 5349 (in Chinese)[郑志远、李玉同、远晓辉、徐妙华、梁文锡、于全芝、张 翼、王兆华、魏志义、张 杰 2006 物理学报 **55** 5349]
- [3] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J *et al* 2006 *Chinese Physics* **15** 2363
- [4] Wang G C, Zheng Z J, Yang X D, Gu Y Q, Liu H J, Wen T S, Ge F F, Jiao C Y, Zhou W M, Zhang S G, Wang X X 2005 *Acta Phy. Sin.* **54** 4803 (in Chinese)[王光昶、郑志坚、杨向东、谷渝秋、刘宏杰、温天舒、葛芳芳、焦春晔、周维民、张双根、王向贤 2005 物理学报 **54** 4803]
- [5] Xu M H, Liang T J, Zhang J 2006 *Acta Phy. Sin.* **55** 2357 (in Chinese)[徐妙华、梁天骄、张 杰 2006 物理学报 **55** 2357]
- [6] Krol A, Ikhlef A, Kieffer J C, Bassano D A, Chamberlain C, Jiang Z, Pepin H, Prasad S 1997 *Med. Phys.* **24** 725
- [7] Yu J, Jiang Z, Kieffer J C, Krol A 1999 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **5** 911
- [8] Tillman C, Mercer I, Svanberg S, Herrlin K 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 209
- [9] Kieffer J C, Krol A, Jiang Z, Chamberlain C C, Scalzetti E, Ichalalene Z 2002 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **74** 75
- [10] Reich C, Gibbon P, Uschmann I, Förster E 2000 *Phys. Rev. Lett.*

84 4846

- [11] Salzmann D, Reich C, Uschmann I, Förster E, Gibbon P 2002 *Phys. Rev. E* **65** 36402
- [12] Chen L M, Forget P, Toth R, Kieffer J C, Krol A, Chamberlain C C, Hou B X, Nees J, Mourou G 2004 *Phys. Plasmas* **11** 4439
- [13] Ziener C, Uschmann I, Stobrawa G, Reich C, Gibbon P, Feurer T, Morak A, Düsterer S, Schwoerer H, Förster E, Sauerbrey R 2002 *Phys. Rev. E* **65** 66411
- [14] Pretzler G, Brandl F, Stein J, Fill E, Kuba J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3623
- [15] 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** 16406
- [16] Chen L M, Forget P, Toth R, Kieffer J C, Krol A, Chamberlain C C, Hou B X, Nees J, Mourou G 2003 *Rev. Sci. Ins.* **74** 5035
- [17] Wharton K B, Hatchett S P, Wilks S C, Key M H *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 822
- [18] Sheng Z M, Sentoku Y, Mima K, Zhang J, Yu W, Meyertervehn J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 5340
- [19] Reich C, Uschmann I, Ewald F, Düsterer S, Lübcke A, Schwoerer H, Sauerbrey R, Förster E 2003 *Phys. Rev. E* **68** 56408
- [20] Peng H S, Huang X J, Zhu Q H *et al* 2004 *Proc. SPIE* **5627** 1
- [21] Zhang S G, Huang W Z, Gu Y Q, Jiang G, Xiong Y, Wen X L, Wang G C 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 77 (in Chinese)[张双根、黄文忠、谷渝秋、蒋 刚、熊 勇、温贤伦、王光昶 2006 强激光与粒子束 **18** 77]



Investigation on $K\alpha$ X-ray emission from ultraintense laser-produced hot electrons^{*}

Huang Wen-Zhong¹⁾ Li Yu-Tong²⁾ Xiong Yong¹⁾ Zhang Shuang-Gen¹⁾ Wen Xian-Lun¹⁾ Hong Wei¹⁾
Gu Yu-Qiu¹⁾ Wen Tian-Shu¹⁾ He Ying-Ling¹⁾

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

²⁾ *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 27 November 2006 ; revised manuscript received 6 April 2007)

Abstract

A dispersionless X-ray $K\alpha$ spectrometer is constructed. The experiments were performed using the SILEX-I laser facility. The $K\alpha$ X-ray emission from ultraintense laser-plasma interactions is measured with the spectrometer in front of and behind the foil targets. The conversion efficiency from laser energy to $K\alpha$ X-ray is obtained. The experimental results show that the $K\alpha$ yield increases with the laser energy. With a 100 μm thick Mo foil, the conversion efficiency is 10^{-5} .

Keywords : X-ray emission, laser-foil interactions, $K\alpha$ spectrometer

PACC : 3220R, 5250J, 0785

^{*} Project supported by the Foundation of National Laboratory of Laser Fusion (Grant No. 9140C6802020602).