

软 X 射线条纹相机透射式 Au 与 CsI 阴极谱响应灵敏度标定

曾鹏¹⁾²⁾ 袁铮²⁾ 邓博²⁾ 袁永腾²⁾ 李志超²⁾ 刘慎业^{2)†} 赵屹东³⁾
洪才浩³⁾ 郑雷³⁾ 崔明启³⁾

1) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2011 年 9 月 3 日收到; 2012 年 1 月 16 日收到修改稿)

本文利用北京同步辐射光源 (BSRF), 提出了对条纹相机 Au 和 CsI 透射阴极谱响应灵敏度进行绝对标定的方案, 给出了在 60—5500 eV 能区的绝对谱响应灵敏度, 标定不确定度好于 10%. 同时, 基于 Henke 等人的计算模型, 给出了透射阴极的相对谱响应灵敏度, 并且进行了 CH 支撑衬底 X 射线透过率的修正. 结果表明标定值与理论值符合较好.

关键词: X 射线条纹相机, 光阴极, 同步辐射

PACS: 52.70.-m, 85.60.Ha, 41.50.+h

1 引言

间接驱动惯性约束聚变实验 (ICF) 中, 激光通过柱腔入口入射到腔壁上产生等离子体, 激光与等离子体相互作用过程中约 90% 的能量转化为 X 射线辐射, 其中软 X 射线 (0.1—10 keV) 占辐射能量的绝大部分. 定量测量软 X 射线的能谱可以更好的研究激光束与等离子体相互作用过程中所发生的物理过程^[1-3]. 具有时间分辨能力的软 X 射线条纹相机是进行软 X 射线特性研究的主要诊断设备, 与能量分辨元件如透射光栅、晶体和多层镜等配合, 可以测量辐射能谱的时间演化行为^[4-6]. 置于条纹相机前端的透射式光阴极进行光电转换, 是相机的能量响应元件. 对于相同强度、不同能量的入射光, 光阴极产生的电信号强度是不同的. 因此, 作为定量的诊断手段, 很有必要对阴极的能量响应进行绝对标定.

Henke^[7-9], Fraser^[10] 等人曾对软 X 射线透射式光阴极做了卓有成效的工作. 他们从 X 射线光子与固体作用机理入手, 研究了光电子的发射过程, 并且提出了金属和非金属对应的光电子发射效率模型. Henke 还利用线光源, 测量了 Au, CsI 的灵敏度^[8], 给出了大多数元素的光电截面数据^[9]. 本文从 Henke 的光阴极模型入手, 结合实际情况, 考虑支撑膜对 X 射线的吸收, 进行了实际光阴极的相对灵敏度的计算, 并与标定结果进行了对比.

受制作工艺、环境因素等影响, 光阴极理论模型并不能准确的给出实际的灵敏度曲线. 因此对于高精度的 ICF 诊断实验, 应遵循“标定后再使用”的原则. 易荣清等人在同步辐射光源上整体标定了软 X 射线条纹相机的能量响应^[11]. 结果不确定度为 23%. 本文利用北京同步辐射光源, 对光阴极进行标定, 并且提出了一套可靠的标定方法, 得到了透射 Au 和 CsI 阴极的灵敏度曲线, 不确定度好于 10%. 为后续的 ICF 实验提供了重要的参考数据.

† E-mail: lsye1029@yahoo.com.cn

2 软 X 射线条纹相机

软 X 射线条纹相机主要由前置光阴极、扫描变像管 (包括加速电极、聚焦电极、偏转电极和荧光屏)、像增强器、图像处理系统以及电子学控制线路组成^[11]. 如图 1 所示, 光阴极与狭缝固定在一起, 入射光经过前置狭缝打到光阴极上, 与阴极作用在背面发射光电子; 光电子经过加速、聚焦, 然

后在斜坡电压作用下按时间顺序进行不同程度的偏转; 再经过像增强器的增强作用, 最后被图像处理系统所接收得到空间一维和时间维的扫描图像. 电子图像在扫描方向的宽度对相机的时间分辨能力有重要影响, 为了保证条纹相机的时间分辨能力, 必须用前置狭缝限制有效阴极的宽度, 但是这样给光阴极的谱响应灵敏度标定造成了相当大的困难, 体现在信号弱、难对光等方面.

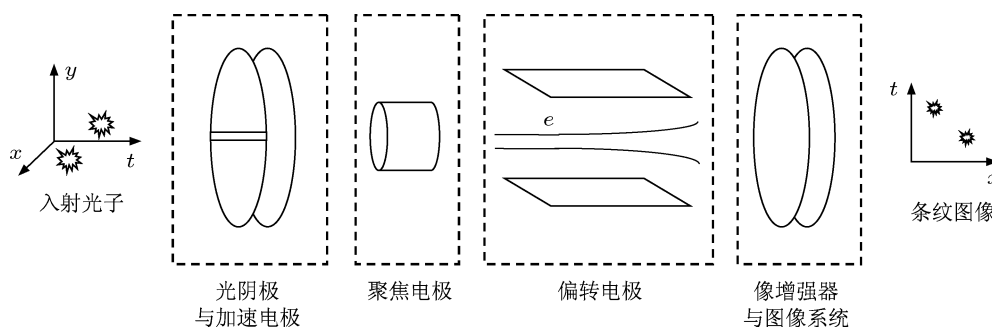


图 1 条纹相机工作模型

3 光阴极谱响应灵敏度和光电子发射模型

谱响应灵敏度 $R(E)$ 是光阴极最重要的一个特性, 如下式定义为发射光电流与单色入射光强的比值, 单位 A/W , 其中 E 代表入射光子的能量, 单位 eV , $n_e(E)$ 和 $n_p(E)$ 分别代表单位时间内发射的电子数与入射的光子数. 谱响应灵敏度直接表征了光阴极的能量响应特性.

$$R(E) = \frac{n_e(E)}{n_p(E)E}. \quad (1)$$

Henke 等人研究了 Au 和 CsI 等阴极材料, 在谱响应灵敏度方面做了卓有成效的工作, 建立了透射式光阴极的电子发射“三步式”模型^[7,8].

第一步 强度 I_0 、能量 E 的 X 射线正入射到光阴极, 阴极厚度 t 处的微元厚度 dt 层吸收光子能量为 $I_0 E \rho \mu(E) \exp(-\rho \mu(E)t) dt$, 其中 ρ 表示材料密度, $\mu(E)$ 为材料对能量 E 的 X 射线的质量吸收系数.

第二步 被激发的原子通过俄歇电子发射或荧光退激到能量基态, 直接激发的光电子和随后的

俄歇电子能量较高, 称为初级电子. 只有很少一部分初级电子直接从材料表面逸出, 大多数初级电子在材料内部通过碰撞等作用进行能量转移, 产生能量很低的二次电子. X 射线能量范围内的光电转换, 主要是利用二次电子. 实验表明^[8], 逃逸出的二次电子能量分布与入射光子能量无关, 其平均能量 E_{ka} 只与材料有关系. 在这一步产生的二次电子数目为

$$dN_{sec} = I_0 E \rho \mu(E) \exp(-\rho \mu(E)t) dt / E_{ka}. \quad (2)$$

第三步 这些电子在材料内部与电子或者声子碰撞, 最终一部分移动到材料后表面, 并克服阴极材料的表面势垒, 从表面逸出. 假设经过多次碰撞后二次电子达到阴极后表面的概率为 P , 同时克服表面势垒逸出表面的概率为 K , 最后逸出的二次电子数目为

$$dN = K P I_0 E \rho \mu(E) \exp(-\rho \mu(E)t) dt / E_{ka}. \quad (3)$$

定义二次电子在材料中的有效逃逸深度 λ_s , 对于透射式的光阴极, 只有在后表面附近厚度为 λ_s 的体积内产生的二次电子才能发射出来. 对式 (3) 在厚度范围 $(t - \lambda_s, t)$ 内积分得到阴极后表面出射

的电子数

$$N = KPI_0 E \rho \mu(E) \lambda_s \exp(-\rho \mu(E)t) / E_{ka}, \quad (4)$$

对于 Au 材料, 二次电子输运时, 电子 - 电子散射起主要作用. 二次电子输运到后表面的概率 P 为 $(1 - \exp(-t/\lambda_s))^{[7,12]}$. 表面逸出概率 K 与入射光能量无关, 但是易受与材料、制作工艺、表面状态甚至存放时间^[13] 等实际因素的影响. 结合 (4) 式得到相对谱响应灵敏度计算公式为

$$R(E) \propto \rho \mu(E) \lambda_s \exp(-\rho \mu(E)t) \times (1 - \exp(-t/\lambda_s)). \quad (5)$$

对于非金属 CsI, 二次电子输运时的主要过程是电子 - 声子散射. 同样的, 概率 P 为 $\tanh(t/\lambda_s)^{[7,12]}$. 相对谱响应灵敏度计算公式为

$$R(E) \propto \rho \mu(E) \lambda_s \exp(-\rho \mu(E)t) \tanh(t/2\lambda_s). \quad (6)$$

Au 和 CsI 的有效逃逸深度 λ_s 分别取 4 nm 和 25 nm^[7,8,12]. 另外, 本文所标定的光阴极采用厚度为 30 nm 的 Au 和 100 nm 的 CsI. 在此厚度条件下阴极膜无法实现自支撑, 极易破裂, 因此采用机械性能良好、对 X 射线吸收小的 CH 膜作为衬底, 厚度在几百个 nm 左右, 如图 3 所示. CH 膜在 280 eV 附近有明显的 C-K 吸收边, 理论计算时应该考虑 CH 对 X 射线的衰减影响. 本文标定的 Au 阴极 CH 膜厚度为 200 nm, CsI 阴极 CH 膜厚度为 1000 nm.

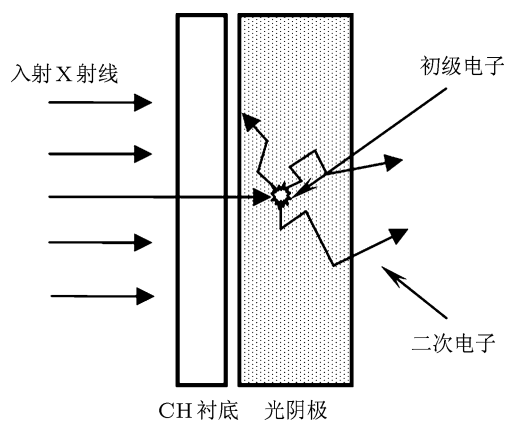


图 2 带 CH 衬底的光阴极发射模型

利用 (5), (6) 式计算出 30 nm 的 Au 和 100 nm 的 CsI 的相对灵敏度, 同时考虑 CH 膜对 X 射线的衰减作用, 理论计算结果如图 3 所示. 图中实线

表示仅有 Au 和 CsI 时的相对灵敏度曲线, 虚线表示考虑 CH 膜影响得到的相对灵敏度曲线. 可以看出, 在低能端 (< 1000 eV), 尤其是在 C-K 吸收边 (280 eV) 附近, CH 膜的对灵敏度的影响十分显著. CH 膜对高能 X 射线的透过率很高, 因而在高能端对灵敏度影响甚小.

上述计算的是 Au 和 CsI 光阴极的相对谱响应灵敏度. 标定完光阴极的绝对灵敏度后, 可调整相对灵敏度的比例系数, 与实际的灵敏度曲线对比, 考察标定数据.

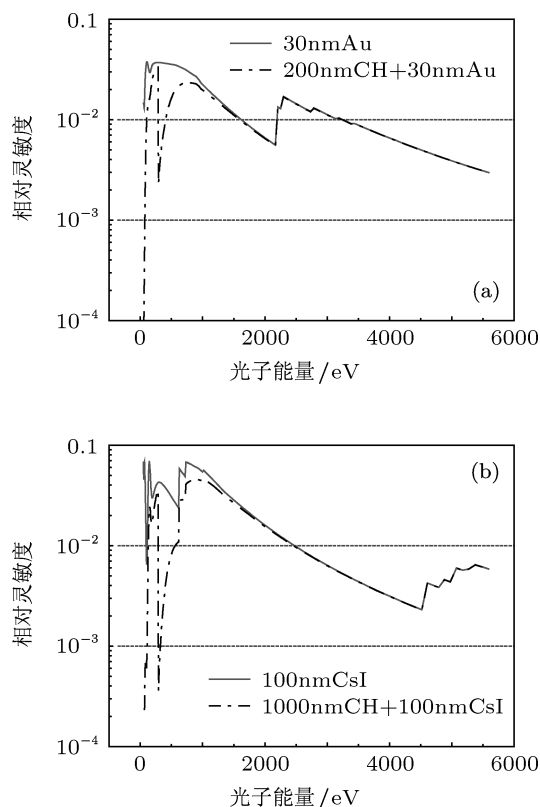


图 3 (a) Au 光阴极计算曲线 (Au 膜厚度 30 nm, CH 膜厚度 200 nm); (b) CsI 光阴极计算曲线 (CsI 膜厚度 100 nm, CH 膜厚度 1000 nm)

4 标定方法和实验安排

光阴极谱响应灵敏度标定在北京同步辐射光源 (BSRF) 上进行. 同步辐射光源具有单色性好、强度高、能区宽、连续可调的优点, 是理想的标定光源^[14]. 北京同步辐射光源 (BSRF) 提供了低能 (60—1600 eV) 和中能 (2200—5500 eV) 两条束线, 覆盖 ICF 所关心的软 X 射线能区 (50—4000 eV), 同时, 实验采用 AUX-100 型 Si 探测器作

为标准探测器, 测量标定源的绝对强度.

本文直接对光阴极进行标定. 待测光阴极由深圳大学光电子学研究所制作提供. 如图 4(a) 所示, 带狭缝的待测光阴极安装在聚四氟乙烯圆柱支架上, 前置狭缝尺寸为 $1\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 长边水平放置. 用聚四氟乙烯垫圈隔开阴极与后面的铜收集板, 光阴极与铜收集板距离为 2 mm . 光阴极加上负偏压, 利用铜板收集光电流. 图 4(b) 为光阴极电流测量电路图. 对于本文标定的光阴极, 计算得到 X 射线透过率在 $50\%—90\%$ 甚至更高, 直穿而过的 X 射线照射到铜收集板上, 其表面会逸出能量较高的初级电子, 产生反向电流影响光阴极电流的测量. 因此, 在铜收集板中间开了一个与光阴极狭缝对齐的狭缝, 避免直穿光的影响, 同时所加的偏压也能保证光电子能够收集完全. 对上述的 Au 光阴极装置进行了不同入射光能量下的偏压测试, 图 5 曲线表明, 偏压加至 -100 V 时光电子可以被收集完全.

在 BSRF 上的实验布局如图 6 所示. 光阑、光阴极以及标准 Si 探测器安放于与束线相接的真空腔室内, 三者中心均位于光路上. 同步辐射白光经过单色器, 通过调整光栅角度可以在同一出射方向上得到不同能量的单色光束. 前置光阑竖直宽 0.5 mm , 利用激光水平仪调整前置光阑与阴极狭缝, 使得两者长边均水平. 光束透过光阑, 得到的光斑大小约为 $0.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. 光阴极可以竖直上下移动. 利用电流计测量光电流, 调整光阴极竖直方向的位置, 从而使得光源光斑全部落在阴极有效区域内. 标准 Si 探测器有效面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 保证全部接收经过光阑的入射光光斑. 可以认为, 阴极与标准探测器各自接收的光强完全一致. 本文将光阑置于光源焦点附近, 保证了光源的强度, 提高了信噪比.

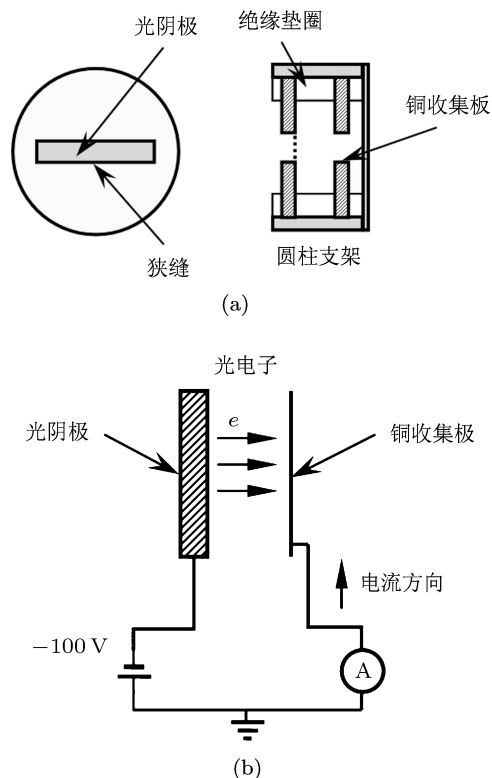


图 4 (a) 光阴极标定装置结构; (b) 光电流测量电路图

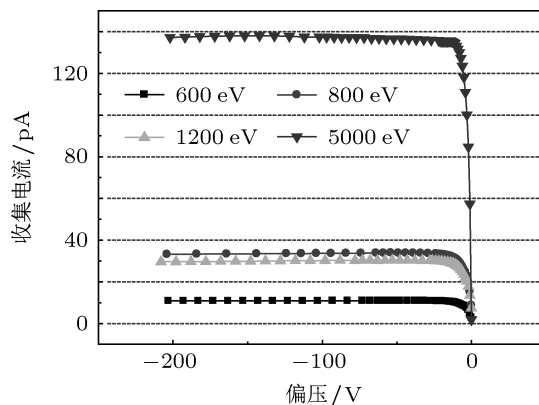


图 5 Au 光阴极偏压曲线

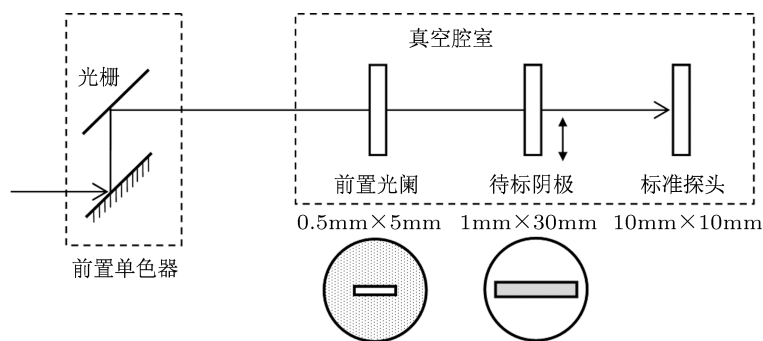


图 6 标定实验布局示意图

光阴极电流与标准探测器电流由同一台吉时利 6517A 弱电流计的不同通道进行测量, 同时电流计电压输出通道供光阴极 -100 V 电压. 光阴极完全升起不在光路中时, 标准探测器测得电流 I_0 , 光阴极降入对准在光路中时, 测得光阴极电流 I_1 . 标准探测器灵敏度 R_{sta} 已由美国 NIST(National Institute of Standards and Technology) 给出. 待测光阴极的灵敏度可以计算得出

$$R(E) = \frac{I_1(E)R_{\text{sta}}(E)}{I_0(E)}. \quad (7)$$

5 标定结果与分析

图 7 所示为 Au 阴极和 CsI 阴极标定结果与理论值的比较. 实线为修正后的理论计算曲线, 三角形数据点为实验测量数据. 可见理论与标定值符合很好, 说明实验数据的可靠性. C-K($\sim 280\text{ eV}$) 吸收边非常明显, 附近电流信号很弱, 信噪比差, 因而此处标定数据符合得不好. 在中能区 CH 膜对 X 射线透过率高(95%以上), 没有吸收边的影响, 对阴极响应影响甚小.

对于 Au 阴极, 在中能区可以清楚的辨认出 Au-M 带中 2300 eV, 2700 eV, 3150 eV 和 3400 eV 四条特征吸收边. 对于 CsI 阴极, 在中能区可以清楚的辨认出 I-L 的 4550 eV, 4850 eV 和 5190 eV 吸收边以及 Cs-L 的 5010 eV 和 5350 eV 吸收边. 可以看到在 CsI 吸收边带的标定值略低于理论值, 猜想原因是此处吸收边多, 理论计算所采用的截面数据精度不高; 另外由于 CsI 在大气中极易潮解, 在标定时也应特别注意. 可以看出, 本文所标定的 CsI 阴极灵敏度比 Au 阴极高 2—10 倍. 表 1 列出了此次实验所测量到的各元素吸收边.

易荣清等人^[11]采用面积比例的方法来进行标定, 即光阴极(缝宽小于 1 mm)只截取光斑(5 mm \times 7 mm)一部分, 而标准探测器接收了全部光斑, 其测得的信号需要乘以面积比例系数. 此种方法中光斑的不均匀性会带来很大的误差. 本次标定采用的是小光斑全部吸收测量方法, 避免了光斑不均匀性, 同时提高了信号的强度. 阴极电流噪声基本维持在 $5 \times 10^{-14}\text{ A}$, 测量信号强度达数十皮安至纳安, 阴极电流测量不确定度小于 1%. 标准探测器灵敏度数据不确定度小于 5%, 其电流测量不确定度小于 1%. 实验中没有使用谐波镜滤

掉谐波, 光源谐波以及光束抖动带来的不确定度小于 5%. 同时实验的安装精度为 5%. 因此认为此次标定的不确定度好于 10%.

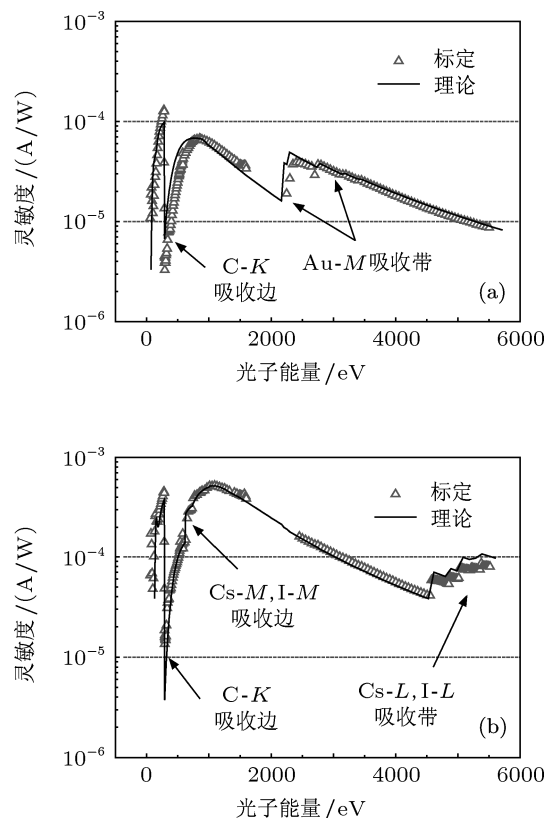


图 7 (a) 光阴极灵敏度标定曲线与理论计算比较 (Au 膜厚度 30 nm, CH 膜厚度 200 nm); (b) CsI 阴极灵敏度标定曲线与理论计算比较 (CsI 膜厚度 100 nm, CH 膜厚度 1000 nm)

表 1 实验测得各元素的吸收边

元素	能级	能量/eV
C	K 1 s	284
	M ₄ 3d _{3/2} (M ₅ 3d _{5/2})	2300(2200)
Au	M ₃ 3p _{3/2}	2700
	M ₂ 3p _{1/2}	3150
	M ₁ 3s	3400
Cs	L ₃ 2p _{3/2}	5010
	L ₂ 2p _{1/2}	5350
	L ₃ 2p _{3/2}	4550
I	L ₂ 2p _{1/2}	4850
	L ₁ 2s	5190

表2 实验误差分析

误差来源	不确定度 /%
弱电流计	光阴极电流 1 标准探测器 1
标准探测器灵敏度	5
谐波与光束抖动	5
安装精度	5

6 结论

本文基于 Henke 等人的光阴极电子发射模型, 分别计算了软 X 射线条纹相机的 Au 和 CsI 光阴极的相对谱响应灵敏度曲线, 并且标定了光阴极的

绝对谱响应灵敏度曲线. 标定采用小光斑全部吸收测量方法, 避免大面积光斑不均匀性带来的高不确定度. 同时信噪比高, 特征吸收边清晰可辨, 能量分辨率好. 标定的误差主要来自光源、标准探测器灵敏度以及安装精度. 理论计算与实测数据符合得很好, 但是仍有部分数据存在明显差异, 如 C 吸收边以及 CsI 吸收边附近.

通过上述研究, 获得了软 X 射线条纹相机透射 Au 和 CsI 阴极的谱响应灵敏度曲线, 并且建立了可靠的阴极灵敏度标定方法, 为量化测量 X 射线能谱打下了基础. 进一步的工作是优化标定方案, 减小各个环节的误差, 提高标定精度.

深圳大学光电子学研究所杨勤劳等制作提供了条纹相机的透射 Au, CsI 光阴极, 在此表示感谢.

- [1] Weaver J L, Feldman U, Seely J F, Holland G, Serlin V, Klapisch M, Columbant D, Mostovych A 2001 *Phys. Plasma* **8** 5230
- [2] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, Liu S Y, Zheng Z J, Zhang B H, Zhang J Y, Huang T X, Li S W, Chen J B, Jiang X H, Yi R Q, Yang G H, Yang J M, Hu X, Cao Z R, Huang Y X 2009 *Sci. China*. **39** 1571 (in Chinese) [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 张继彦, 黄天暄, 李三伟, 陈家斌, 蒋小华, 易荣清, 杨国洪, 杨家敏, 胡昕, 曹柱荣, 黄翼翔 2009 中国科学 **39** 1571]
- [3] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y K, Lliu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Pei W B, He X T 2009 *Act. Phys. Sin.* **58** 3255 (in Chinese) [李三伟, 易荣清, 蒋小华, 何小安, 崔延莉, 刘永刚, 丁永坤, 刘慎业, 蓝可, 李永升, 吴畅书, 古培俊, 裴文兵, 贺贤士 2009 物理学报 **58** 3255]
- [4] Eagleton R T, James S F 2004 *Rev. Sci. Instrum* **75** 3969
- [5] Cone K V, Dunn J, Schneider M B, Baldis H A, Brown G V, Emig J, James D L, May M J, Park J, Shepherd R, Widmann K 2010 *Rev. Sci. Instrum* **81** 10E318
- [6] Hu X, Jiang S E, Cui Y L, Huang Y X, Ding Y K, Liu Z L, Yi R Q, Li C G, Zhang J H, Zhang H Q 2007 *Act. Phys. Sin.* **56** 1447 (in Chinese) [胡昕, 江少恩, 崔延莉, 黄翼翔, 丁永坤, 刘忠礼, 易荣清, 李朝光, 张景和, 张华全 2007 物理学报 **56** 1447]
- [7] Henke B L, Smith A, Attwood D T 1977 *J. App. Phys.* **48** 1852
- [8] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K 1981 *J. App. Phys.* **52** 1509
- [9] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 *Atomic Data. Nucl. Data. Tab.* **54** 181
- [10] Fraser G W 1983 *Nucl. Instrum. Methods* **206** 251
- [11] Yi R Q, Zheng Z J, Hu X, Cui M Q, Zhao Y D, Zhu P P 2003 *High Energy Phys. and Nuclear Phys.* **27** 452 (in Chinese) [易荣清, 郑志坚, 胡昕, 崔明启, 赵屹东, 朱佩平 2003 高能物理与核物理 **27** 452]
- [12] Li M, Ni Q L, Chen B 2009 *Act. Phys. Sin.* **58** 6894 (in Chinese) [李敏, 尼启良, 陈波 2009 物理学报 **58** 6894]
- [13] Wu G, Wu J, Qiu A C, Wang L P, Lu M, Qiu M T, Cong P T, Zheng L, Cui M Q, Zhao Y D 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 1285 (in Chinese) [吴刚, 吴坚, 邱爱慈, 王亮平, 吕敏, 邱孟通, 丛培天, 郑雷, 崔明启, 赵屹东 2010 强激光与粒子束 **22** 1285]
- [14] Yi R Q, Yang G H, Cui Y L, Du H B, Wei M X, Dong J J, Zhao Y D, Cui M Q, Zheng L 2006 *Act. Phys. Sin.* **55** 6287 (in Chinese) [易荣清, 杨国洪, 崔延莉, 杜华冰, 韦敏习, 董建军, 赵屹东, 崔明启, 郑雷 2006 物理学报 **55** 6287]

Spectral response calibration of Au and CsI transmission photocathodes of X-ray streak camera in a 60—5500 eV photon energy region

Zeng Peng¹⁾²⁾ Yuan Zheng²⁾ Deng Bo²⁾ Yuan Yong-Teng²⁾ Li Zhi-Chao²⁾
Liu Shen-Ye^{2)†} Zhao Yi-Dong³⁾ Hong Cai-Hao³⁾ Zheng Lei³⁾ Cui Ming-Qi³⁾

1) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)

3) (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 3 September 2011; revised manuscript received 16 January 2012)

Abstract

A method is described of measuring absolute spectral response for Au and CsI transmission photocathodes in soft X-ray streak camera, which is of great importance for the inertial confinement fusion (ICF) diagnostics. Transmission photocathode is conventionally employed as photo-to-electron conversion accessories. To derive quantity information of X-ray spectra, the absolute response of photocathode must be calibrated in a range of interest. Here Au and CsI transmission photocathodes with slits are calibrated respectively on Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF), in a photon energy range of 60 eV—5500 eV. This method has an uncertainty less than 10% and good feasibility. Calibration results are in good agreement with the calculation results obtained from the Henke's photon emission model, with CH substrate effect revised.

Keywords: X-ray streak camera, photocathode, BSRF

PACS: 52.70.-m, 85.60.Ha, 41.50.+h

† E-mail: lsye1029@yahoo.com.cn