2 000~2 800 eV 软 X 光入射 CsI(Tl)闪烁体的探测效率标定

王 静[1],张文海[1],杨国洪[1],韦敏习[1*],郑 雷[2]

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900;
2. 中国科学院北京高能物理研究所,北京 100049)

摘 要: CsI(Tl)闪烁体是 X 光转换为可见光的一个比较重要的部件,其转换效率对惯性约束聚变中的 X 光诊断发挥关键作用。利用北京同步辐射装置 4B7A 中能束线,针对 2 000~2 800 eV 能段的软 X 光入射不同厚度 CsI(Tl)闪烁体后转换为可见光的探测效率进行了标定。文章详细分析了 CsI(Tl)闪烁体在 X 光激发下的能量沉积和出射可见光的效率。整个探测系统包括入射兼容光源、标准探测器、快门、CsI(TI)闪烁体块、黑腔盒,SI1000 可见光 CCD 等。用曲线拟合的方法归一化入射兼容光,利用 SI1000 可见光 CCD 相机作接收系统记录出射可见光,在 CCD 线性工作范围内,得到 CCD 上记录的出射可见光计数。标定实验获得 2 000~2 800 eV 能区标定探测器电流,CCD 计数,得到了同一曝光时间下 CCD 计数和入射光子数的比值,即探测效率。实验结果表明,随着 CsI(Tl)闪烁体厚度的增加,探测效率也随之提高。实验方法为后续选择合适厚度闪烁体做软 X 光探测做基础。

关键词: 惯性约束聚变; CsI(TI)闪烁体; 软 X 光; 标定; 探测效率
中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0917003

Detection efficiency calibraion of CsI(TI) scintillator with 2 000–2 800 eV soft X–ray incidence

Wang Jing[1], Zhang Wenhai[1], Yang Guohong[1], Wei Minxi[1*], Zheng Lei[2]

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: CsI (Tl) scintillator is a key part for the transition from X–ray to visible light, its transition efficiency is of crucial importance in X–ray diagnosis for inertial confined fusion. X–rays could deposit energies into the CsI (Tl) scintillator and visible lights were emitted. The detection efficiency of CsI(Tl) scintillator with different thickness was calibrated on the beamline 4B7A at Beijing Synchrotron Radiation Facility in the energy range between 2 000 eV and 2 800 eV. Energy deposition and energy response with the stimulation of X–ray were studied. The whole system included emitting X–ray, standard detector, shutter, CsI (Tl) scintillator, black box and SI1000 CCD. Emitting X–ray was normalized with curve fitting. SI1000 CCD was used to receive the visible light which the counts were kept in the linearity range of CCD. The experiment gets the detector current, CCD counts, the ratio of CCD counts and emitting X–ray counts in the energy region from 2 000 eV to 2 800 eV. The results show the detection efficiency

收稿日期: 2018–04–10; **修订日期:** 2018–05–20
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11505168)
作者简介: 王静(1988–),女,助理研究员,硕士,主要从事激光聚变辐射 X 射线诊断方面的研究。Email: 673407792@qq.com
通讯作者: 韦敏习(1980–),男,副研究员,硕士,主要从事惯性约束聚变 X 光诊断方面的研究。Email: wmx17@sina.com

increase with the increase of the thickness of CsI (Tl) scintillator. The experimental method makes foundation for the subsequent selection of a suitable thickness of scintillator of soft X-ray detection.

Key words: inertial confinement fusion; CsI(TI) scintillator; soft X-ray; calibration; detection efficiency

0 引 言

X 光转换材料在数字辐射成像系统中具有很重要的作用，它的效率对整个系统的量子探测效率起到决定性的作用[1-3]，CsI(Tl)闪烁体就是一种重要的 X 光转换为可见光的材料[4-6]，可广泛应用于 X 光能谱测量，用来分析惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF) 和激光等离子体相互作用过程中产生的大量丰富的物理信息[7-9]。

在 X 射线诊断设备中，如果把 X 光、CsI(TI)闪烁体、可见光接收设备作为一套完整的探测系统，那么 CsI(TI)闪烁体在整个探测系统中起到非常重要的作用，其探测效率对系统有较大影响，理论计算表明，不同厚度的 CsI(Tl)晶体是一个影响系统空间分辨率和量子探测效率的主要因素[10-11]。选择一种合适厚度的 CsI(TI)闪烁体进行软 X 光探测，也可以便于以后对已知厚度 CsI(TI)闪烁体探测效率的定标化，通过可见光的强度来反推出软 X 光强度，进而进行光与物质之间作用的分析，不仅用于同步辐射源装置，还可以用于主机、原型、神光Ⅱ升级装置等中[12]。

同步辐射光源因其高亮度和稳定性而成为理想的标定光源，北京同步辐射装置(Beijing Synchrotron Radiation Facility, BSRF) 束线的应用，在国内首次提供了能区在 2~6 keV 范围、性能优良的单色 X 射线光源[13]。在北京同步辐射源上 2000~2 800 eV 能区对不同厚度闪烁体在多个入射 X 光能量点进行了实验标定，获得了标准探测器的结果和 CCD 记录计数，得到出射可见光与入射 X 光之比即探测效率。实验标定的方法为后续的软 X 光探测不同厚度闪烁体标定奠定了基础。

1 标定实验排布

1.1 实验装置及条件

实验在北京同步辐射装置 4B7A 中能束线上进行，利用 4B7A 中能段束线及其主真空室，主真空室内放置光阑、机械快门、标准探测器，光阑大小为 2.4 mm×4.0 mm，目的是限制光斑尺寸以及遮挡杂散光。为了避免真空抽气放气浪费时间，直接把闪烁体用设计的样品架夹住放在黑腔盒中直接放置到真空室外，这样方面更换不同厚度闪烁体的操作。制作的黑框包裹闪烁体和 CCD，并且实验的时候用黑布包裹整个黑框盒，防止杂散光进入。光源的强度采用已经标定的 AXUV-100 型硅光二极管作标准进行定量测量，信号引出真空室由美国 Keithley 公司的 6517A 弱电流计记录。实验装置排布图如图1 所示。

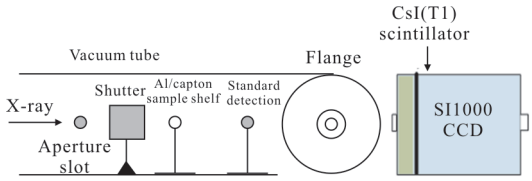

图 1 实验装置排布示意图

Fig.1 Sketch of experimental arrangement

CsI(Tl)闪烁体的长度为20 mm，高度为 50 mm，厚度分别为 20、30 μm，文中有 2 块 20 μm 厚度的 CsI(Tl)闪烁体，分别命名为 20 μm，20 μm(1#)，1块 30 μm 厚度的 CsI(Tl)闪烁体，命名为 30 μm，快门支架有 300 mm 高，整个实验室在屏蔽 X 光的情况下进行，所以黑布包裹着外界法兰接口和包含闪烁体的黑腔盒以及 CCD，为了真空下入射光源以小面积均匀辐射到闪烁体块上，重新设计了一个与同步辐射对接的法兰，左边是标准孔径，右边开 10 mm 通孔，卡槽，O 圈。实验中使用光阑限制光斑大小，用机械快门控制曝光时间，采用标准探测器测量单位时间从光阑穿过的 X 光光强，用可见光 CCD 记录 X 光经过 CsI(TI)闪烁体后穿出的相同曝光时间内的 CCD 计数。闪烁体是沉积而成生长在一定厚度(20 mm)的光纤面板上面，结构紧密均匀，在单个晶柱中光子不会横向扩散。一定能量的带电粒子入射，在晶体中透过电磁相互作用沉积能量；沉积的能量转化为一定数量的闪烁光子发射用可见光 CCD 收

集可见光。X 光探测系统中，CsI(TI)晶体的作用是将 X 光转换为可见光。CsI(TI)闪烁体的发射光谱的峰值波长为 540 nm，与 CCD 的峰值响应波长一致，有利于与 CCD 相机匹配。实验中，CsI(TI)闪烁体与 CCD 对接，可见光 CCD 直接紧挨耦合 CsI(TI)闪烁体后端，X 光经闪烁体后转换变成可见光，可见光以较高效率直接传输到 CCD 光敏面，并完成图像面积的变换，获得分辨率未受影响的图像，最后由系统输出已数值化的图像。

1.2 实验方法及步骤

CsI (Tl) 闪烁体的标定是在北京同步辐射光源 4B7A 束线上完成。分段取 2 000~2 800 eV 的单色 X 光。分段为 2 000、2 200、2 400、2 600、2 800 eV。标定实验的布局图如上图 1 所示。实验中，机械快门，标准探测器，CsI(Tl)闪烁体样品，可见光 CCD 整体排布在同水平一直线上，其中探测器，机械快门是在真空腔内，而 CsI(Tl)闪烁体样品、可见光 CCD 都是套在黑腔盒中置于真空腔外，方便更换 CsI(Tl)闪烁体块，整个系统都用黑布包裹，防止 X 光泄露和可见光进入 CCD，做到屏蔽可见光、杂散光的作用。

具体实验步骤如下：

(1) 首先将标准探测器移入光路，打开机械快门，记录打开时刻，标准探测器在此段时间内的电流会被记录，关闭机械快门，记录关闭时刻(见图 2)。

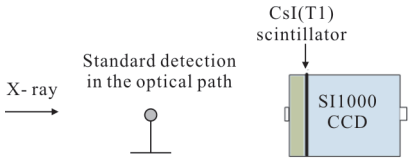

图 2 标准探测器移入光路记录入射 X 光示意图

Fig.2 Schematic diagram of the standard detector moving into the light path to record the incident X-ray

(2) 把标准探测器移出光路，又打开快门，记录打开时刻，一定能量 X 光经过光阑再通过 CsI(Tl)闪烁体转换为可见光出射进入到可见光 CCD 中，CCD 上记录了出射的可见光光子数，关闭机械快门，记录关闭时刻(见图 3)。

(3) 再把探测器移入光路，打开机械快门，记录打开时刻，打开一定时间，再关闭机械快门，记录关闭时刻，在该段时间内，标准探测器记录经过了一定衰减的入射 X 光的电流(见图 4)。

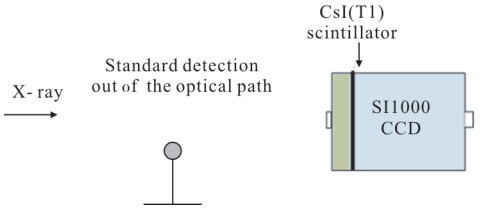

图 3 标准探测器移出光路记录入射到 CsI(Tl)闪烁体内 X 光示意图

Fig.3 Schematic diagram of the standard detector moving out of the optical path to record X-ray into the CsI(Tl) scintillator

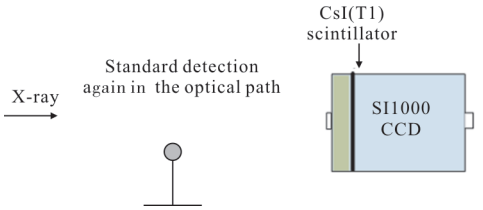

图 4 标准探测器移入光路记录一定衰减后的入射 X 光示意图

Fig.4 Schematic diagram of the standard detector moving into the light path to record a certain attenuation of the incident X-ray

由于入射光呈衰减走势，采用曲线拟合的方法对入射光进行数据拟合，如图 5 所示，经过以上步骤，把第一步和第三步得到的电流用曲线拟合，得到入射 X 光电流分布曲线，而第二步记录的标准探测器移出光路后快门开关的时间，通过曲线积分就能推算出这段时间内入射到 CsI(TI)闪烁体的光通量，在相同快门开关时间内，CCD 也记录了同一时间段从 CsI(TI)闪烁体出射的可见光光子数。

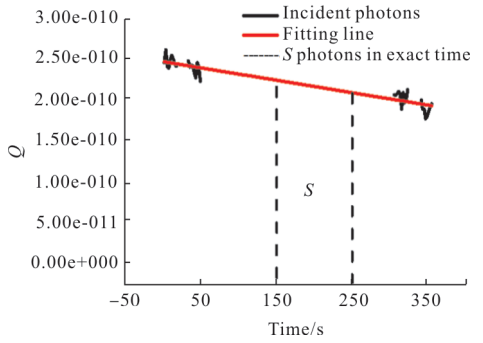

图 5 曲线拟合推算入射到 CsI(Tl)闪烁体内 X 光强度图

Fig.5 Intensity map of the curve fitting that calculates the X-ray into the scintillator of CsI(Tl)

用上述步骤如此反复操作采集多个能点的探测器电流以推断入射光强度以及相同时间内入射到CCD 的可见光光子数。逐能点地标定入射 X 光电流，在每个能点，先将标准探测器移动到光中，使用标准探测器测量单色光强度。然后将标准探测器移出光路，使用 CCD 记录单色光的光斑，CCD 的曝光时间由快门控制，在保证 CCD 不饱和的情况下，使用尽量长的曝光时间。某一时间段入射的 X 光强度，以及同一曝光时间内进入 CCD 内的可见光计数，通过($E_{可见光}/E_{X光}$)=$\eta_{探测效率}$，这样就能得到出射可见光与入射 X 光之比即探测效率。

针对每幅 CCD 的光斑，用 WinView 取相同面积的光斑以保证不同能点测得的 CCD 计数一致性。CCD 得到的图像先采集了本底的，再计算过程中先扣除本底，选择固定区域的 CCD 计数进行积分，并扣除大小相同的本底积分区域，得到 CCD 计数。实验是从能量较低点开始，逐步向高能能点过渡。实验现场实物图如图 6 所示。

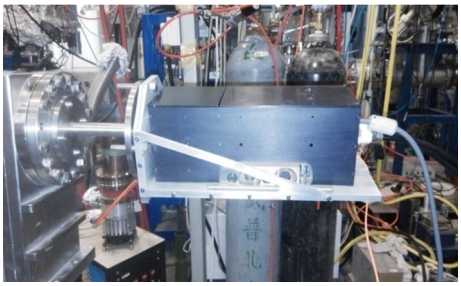

图 6 实验现场实物场景图

Fig.6 Schematic diagram of experimental scene

2 实验结果与讨论

开展实验期间只有兼容光，光源没有专用光稳定。实验前后监测到的光源注入情况是不一致的，在运行过程中光源呈衰减趋势。在不同的时间段内，衰退规律有差异。通过曲线拟合得到了某一段探测时间内的入射平均探测电流，并通过积分计算了在那段时间内的入射光通量，如图 7 所示。

在相同探测时间内，得到 2 200~2 800 eV 不同能点从不同厚度 CsI(Tl)出射的可见光 CCD 计数。为数据一致性方便对比，CCD 的计数面积均相同。CCD 计数曲线如图 8 所示。

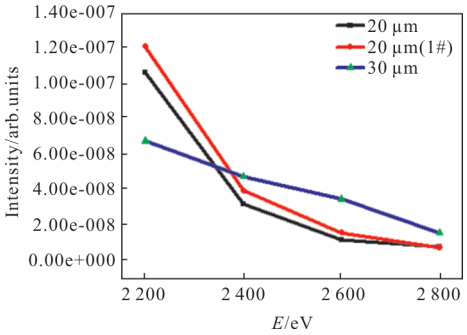

图 7 光通量积分数值曲线

Fig.7 Flux integral value curve

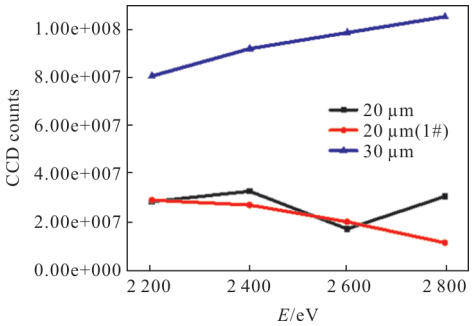

图 8 CCD 记录的从 CsI(Tl)出射可见光光子数曲线

Fig.8 Curve of visible photon emitting from CsI (Tl) recorded by CCD

由于注入的 X 射线在运行过程中光源呈衰减趋势，并且不同能点实验前后光源注入情况不一致，在不同的时间段内，衰退规律有差异。但是通过公式(N_{ccd}/E_{It})=η 得到最终的能量响应结果变化却不大，是因为对源强进行了归一化处理，所以能够得到正确的响应曲线，进而分析不同厚度 CsI(Tl)对于 X 光转换为可见光的转换效率。

从图 9 可以看出，随着 CsI(TI)闪烁体厚度的增

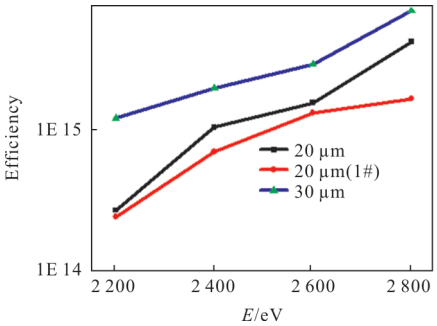

图 9 2 200~2 800 eV 能段不同能量 X 射线入射不同厚度 CsI(Tl)闪烁体的能量响应

Fig.9 Energy response of different energy X-ray incidence of CsI(Tl) scintillator of different thickness with the energy from 2 200 eV to 2 800 eV

加，能量响应也随着增加，说明在相同探测时间下，能量响应随 CsI(TI)闪烁体厚度增加而增加。由于此次实验受兼容光不稳定所限，暂时没有做 2 800 eV 以上能段不同厚度的 CsI(TI)闪烁体响应实验，也没有得到到达某一个能点响应就饱和的曲线，另外 CsI(TI)闪烁体还有 50 μm 厚度的也没有进行测量，但是此次实验确定了实验方法，为后续精准化的标定做了良好的铺垫。根据不同厚度 CsI(TI)闪烁体的 X 光响应曲线，可利用从 CsI(TI)闪烁体出射的可见光反推出入射 X 射线量。

图 9 中纵坐标表示为效率的概念，分子为可见光总通量，目前用 CCD 计数表示，分母为 X 光总通量，目前用标准探测器的计数表示，最终比值为两个计数的比值，无量纲，所以用效率 Efficiency 表示。

表1 2 200~2 800 eV 能段不同能量 X 射线入射不同厚度 CsI(Tl)闪烁体的能量响应

Tab.1 Energy response of different energy X-ray incidence of CsI (Tl) scintillator of different thickness with the energy of 2 200-2 800 eV

Energy/eV	Thickness		
	20 μm	20 μm(1#)	30 μm
2 200	2.66419e+14	2.38970e+14	1.19293e+15
2 400	1.0274e+15	6.87652e+14	1.94917e+15
2 600	1.52921e+15	1.30067e+15	2.86765e+15
2 800	4.13944e+15	1.63504e+15	6.88462e+15

3 结 论

文中提出了一种低能段软 X 光入射微米级小面积 CsI(Tl)闪烁体的探测效率标定方法，该方法在标定过程中采取分能点标定的分类安排，细化数据，获得不同能点下的 CCD 接收到的出射 X 光计数与入射 X 光能量之比，即探测效率。通过曲线拟合的方法对数据进行修正，从而获得较为精准的不同能量软 X 光入射不同厚度 CsI(Tl)闪烁体的探测效率。实验结果表明，标定的实验数据结果符合理论模拟结果[8]，随着 CsI(TI)闪烁体厚度的增加，能量响应也随着增加，说明在相同探测时间下，能量响应随 CsI(TI)闪烁体厚度增加而增加。该标定方法可以推广到其他探测元件的标定中。在软 X 射线光束线上，利用性能稳定、能点连续可调的软 X 射线标定源。进行了光源的性能研究和的 CsI(Tl)闪烁体标定实验，取得了较好结果。

参考文献：

[1] Xie Yijun, Guo Lina, Liu Shuang, et al. Study on the effect of deposition rate and concentration of Eu on the fluorescents lifetime of the CsI:Tl thin films [J]. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Reasearch A***, 2017, 858(1): 18-21.

[2] Fu Zuoling, Dong Xiaorui, Sheng Tianqi, et al. Luminescene properties and various mechanisms of rare earth ions in the nanocrystals[J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(1): 139-144. (in Chinese)

[3] Zhou Hongjun, Xia Xuanzhi, Huo Tonglin, et al. Distribution and suppression of higher-order harmonics of metrology beamline in 5-140 nm [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(7): 1550-1556. (in Chinese)

[4] Gu Mu, Zhang Min, Liu Xiaolin, et al. Growth process of CsI scintillating films with micro-columnar structure by thermal evaporation [J]. ***High Laser and Partical Beams***, 2010, 22(2): 374-378. (in Chinese)

[5] Hou B, Nees J A , Theobald W, et al. Dependence of hard X-ray yield on laser pulse parameters inthe wavelength-cubed regime[J]. ***Appl Phys Lett***, 2004, 84(13): 225922261.

[6] Liu Shuang, Guo Lina, Xie Yijun, et al. Study on cracks of columnar CsI (Tl) scintillating films [J]. ***Journals of University of Electronic Science and Technology of China***, 2016, 45(4): 784-788. (in Chinese)

[7] Liao Hua, Hu Xin, Yang Qinlao, et al. Experimental study on an X-ray CsI(Tl) converting screen with large format and high spatial resolution [J]. ***Journals of Shenzhen University Science and Engineering***, 2014, 31(3): 174-178. (in Chinese)

[8] Shuichi Tsuda, Kimiaki Saito. Spectrum-dose conversion operator of NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillation detectors for air dose rate measurements in contaminated environments [J]. ***Journal of Environmental Radioactivity***, 2017, 166(1): 419-426.

[9] Liu Lifeng, Xiao Shali, Qian Jiayu. X-ray spectral diagnosis for laser plasma [J]. ***Optics and Precision Engineering***,

2017, 25(5): 1192-1196. (in Chinese)

[10] Wang Hongjian, Yang Qingguo, Ye Yan, et al. Multi-KeV X-ray conversion efficiencies of laser-irradiated nano-velvet Cu targets [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45 (11): 1106008. (in Chinese)

[11] Yi Longtao, Sun Tianxi, Wang Kai, et al. Design of an X-ray detecting system based on square polycapillary X-ray lens [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45 (S1): S117001. (in Chinese)

[12] Wang Jing, Su Ming, Yang Zuhua, et al. Soft X-ray energy corresponding of CsI (Tl) scintillator [J]. ***High Laser and Partical Beams***, 2015, 27(12): 122006. (in Chinese)

[13] Yi Rongqing, Yang Guohong, Cui Yanli, et al. Study of X-ray detector system characteristics on the 3B3 medium energy beamline in BSRF [J]. ***Journal of Acta Physica Sinica***, 2006, 55(12): 6287-6292. (in Chinese)