

## 10~100 keV 能区硬 X 光探测器精密校准及应用

何小安<sup>1\*</sup>, 易荣清<sup>1</sup>, 李朝光<sup>1</sup>, 陈伯伦<sup>1</sup>, 李凡<sup>2</sup>, 郑建华<sup>1</sup>, 薛艳玲<sup>3</sup>, 王峰<sup>1</sup><sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;<sup>2</sup>中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院上海同步辐射光源, 上海 201204

**摘要** 在惯性约束聚变实验研究中,硬 X 光光谱的定量诊断设备滤波荧光谱仪的核心探测元件为硬 X 光闪烁探测器。鉴于此,建立一种基于半导体硬 X 光二极管的硬 X 光探测器能量灵敏度校准方法,其具有快速简便的优点,量值溯源不依赖放射源强度,校准不确定度为 7%。首先,利用该方法分别在硬 X 光机和上海同步辐射光源上实现对碘化钠和氟化钡闪烁探测器在不同能量灵敏度范围的能量灵敏度校准。其次,使用蒙特卡罗模拟程序 Geant4 计算两种类型探测器的理论灵敏度曲线,并与校准实验结果进行比较分析,将校准数据外推到整个能量范围(10~100 keV)。最后,将该方法应用到真空隔离片能量透过率的精密校准,低灵敏 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的校准结果可应用于高亮度硬 X 光源实验的研究。

**关键词** X 射线光学; 硬 X 光二极管; 能量灵敏度; 硬 X 光闪烁探测器; 精密校准; 硬 X 光光谱

中图分类号 O434.12; O536

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134014

## Precise Calibration and Application of Hard X-Ray Detector in Energy Range of 10–100 keV

He Xiaolan<sup>1\*</sup>, Yi Rongqing<sup>1</sup>, Li Chaoguang<sup>1</sup>, Chen Bolun<sup>1</sup>, Li Fan<sup>2</sup>,  
Zheng Jianhua<sup>1</sup>, Xue Yanlin<sup>3</sup>, Wang Feng<sup>1</sup><sup>1</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;<sup>2</sup>High Energy Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Synchrotron Radiation Facility, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

**Abstract** In the experimental study of inertial confinement fusion, the core detection element of the filter fluorescence spectrometer in quantitative diagnostic equipment for hard X-ray spectroscopy is the hard X-ray scintillation detector. In view of this, a method for calibrating the energy sensitivity of hard X-ray detectors based on semiconductor hard X-ray diodes is established, which has the advantages of fast and simple. The traceability of the quantity does not depend on the intensity of the radioactive source, and the calibration uncertainty is 7%. First, the proposed method is used to calibrate the energy sensitivity of sodium iodide and barium fluoride scintillation detectors in different energy sensitivity ranges on hard X-ray machine and Shanghai synchrotron radiation light source, respectively. Second, the theoretical sensitivity curves of the two types of detectors are calculated by using the Monte Carlo simulation program Geant4, and compared with the calibration experimental results, the calibration datasets are extrapolated to the whole energy range (10–100 keV). Finally, the proposed method can be applied to the precise calibration of energy transmittance of vacuum isolator, and the calibration results of low sensitive BaF<sub>2</sub> scintillation detector can be applied to the experimental study of high brightness hard X-ray sources.

**Key words** X-ray optics; hard X-ray diode; energy sensitivity; hard X-ray scintillation detector; precise calibration; hard X-ray spectrum

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-02-16; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金(YZJLX2019011)、国家科技重大专项项目

通信作者: \*hexiaolan1984@163.com

## 1 引言

在激光惯性约束聚变实验研究中,高功率激光烧蚀靶物质会产生高温、高密度的等离子体,通过激光与等离子体的非线性相互作用可激发大振幅的电子等离子体波、离子声波等集体运动行为,其中电子等离子体波在朗道阻尼、非线性频移、波破等物理机制的作用下会产生较长射程的超热电子<sup>[1-4]</sup>。超热电子与靶物质的韧致辐射过程所产生的硬 X 光(能量为 10~100 keV)携带了大量的物理信息,通过对这部分硬 X 光能谱的精密测量可以给出超热电子的温度、能量及时间分布<sup>[5-6]</sup>,这对理解激光与等离子体的非线性相互作用过程十分重要。另外,该能量范围内的高亮度硬 X 光背光源可应用于等离子体的背光阴影照相、仪器元器件的 X 光辐照效应测试等重要过程。硬 X 光能谱定量诊断的主要设备之一是滤波荧光谱仪<sup>[7-8]</sup>,硬 X 光闪烁探测器是其核心探测元件。目前,国内已利用标准放射源直流法、同步辐射光源直流法、单光子计数法等对 NaI 闪烁探测器灵敏度的校准进行了系列研究<sup>[9-13]</sup>。国外也利用硬 X 光机和标准放射源,使用晶体单色化、高纯锗(HPGe)作为次级标准对 NaI、BaF<sub>2</sub>、CdTe 等硬 X 光探测器灵敏度的校准进行了实验研究<sup>[14-16]</sup>。高纯锗探测器具有很高的能量分辨率,目前的硬 X 光能谱诊断由于受到探测器能谱分辨率的限制并且该器件是不必要的,系统需要工作在液氮冷却的低温条件下,其在强辐射照射下容易损坏,而且高纯锗探测器仍然需要标准放射源来实现量值溯源。硬 X 光时间过程的诊断常用具有较高时间分辨能力(时间分辨率为 600 ps)的 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器,由于其探测效率较 NaI 低约两个量级,而且一般硬 X 光机的强度不能满足,故国外利用高强度的放射源来实现探测器能量灵敏度的校准<sup>[17]</sup>。但是在标准放射源进行量值溯源时,一般存在半衰期较短、放射分支多、绝对强度统计误差大的缺点,而强放射源的操作安全性差、难于保管等特点,导致其直接校准精度低、便捷性差。

基于以上现实,期望建立一种不依赖于标准放射源进行量值溯源的校准方法来提高探测器的校准精度。本文主要研究了一种基于半导体硬 X 光二极管作为次级标准的校准方法,分别在硬 X 光机和同步辐射光源上实现了低灵敏度、高灵敏度硬 X 光闪烁探测器的校准方法,实验结果为硬 X 光能谱的总量、时间诊断提供了基础数据,对研究激光与等离

子体的非线性相互作用、高亮度硬 X 光源等课题具有重要意义。

## 2 基于半导体硬 X 光二极管的校准方法

### 2.1 校准标准的量值溯源

根据硬 X 光二极管探测器(HXD)能量灵敏度  $S_0$  的基本定义,其可写为

$$S_0 = \frac{e}{\phi}, \quad (1)$$

式中: $e$  为单位电荷的电量,单位为 C; $\phi$  为光子在探测器灵敏层上产生一个电子空穴对所需的平均能量,单位为 keV。

选取滨松 S3590 型硬 X 光二极管,灵敏面的材料为硅。不同硅探测器的  $\phi$  值不同,其还会随着光子能量的变化略有变化,计算值一般采用 3.6 eV,总偏差在 5% 以内。如果入射 X 光在硅的灵敏层上完全吸收并转化为电流,根据式(1)计算的灵敏度为最大值。硅晶体的实际厚度有限,一般选为 0.03 cm,此时部分光子会穿透二极管的工作物质,在计算灵敏度时要扣除衰减掉的部分,根据质量衰减系数的定义可以得到灵敏度  $S_0$  的新表达式,即

$$S_0 = \frac{e}{\phi} \times [1 - \exp(-\mu_m \times \rho \times d)], \quad (2)$$

式中: $\mu_m$  为硅的质量衰减系数,可在国际标准数据库中查询,单位为 cm<sup>2</sup>/g; $\rho$  为硅的密度,单位为 g/cm<sup>3</sup>; $d$  为晶体厚度,单位为 cm。

由式(2)可以看到,质量衰减系数随着入射 X 光能量的变化而改变,所以硬 X 光二极管探测器的灵敏度也与能量相关。作为整个校准实验的标准,硬 X 光二极管必须进行量值溯源。校准实验在德国柏林联邦物理技术研究所(PTB)的实验室中进行,能量范围为 8~60 keV,采用低温辐射计的测量结果作为硬 X 光校准的初级标准。PTB 在同步辐射装置上建立可以提供可见光探测器、X 光探测器、中子探测器等相关探测元器件的定量校准仪器。硬 X 光通过敏窗后进入校准系统的真空管道,接着照射到待校准的硬 X 光二极管上,移出待校准的探测器后再使用低温辐射计作为标准探测器来测量光强,低温辐射计和辐射控制系统如图 1 所示。低温辐射计与待校准的探测器之间相距约 2 m,主要目的是减少探测器的移动对低温辐射计温度控制的影响。为了保证待校准探测器的测量光强与低温辐射计一致,将光源的光斑大小设置为 1 mm×1 mm。

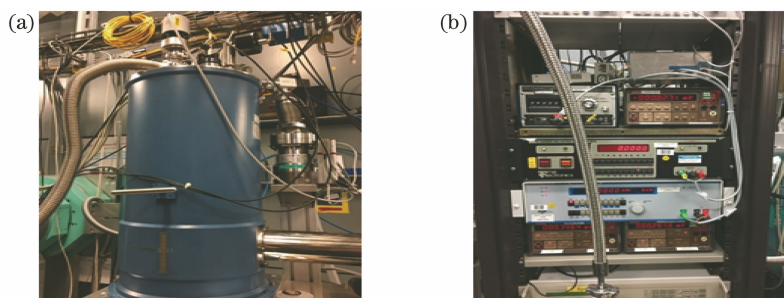


图 1 实验装置示意图。(a)低温辐射计;(b)辐射控制系统

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental device. (a) Cryogenic radiometer; (b) radiation control system

低温辐射计的工作原理: X 光被吸收体吸收后光子能量沉积在吸收体中并将光能转换为热能,从而使吸收体的温度升高,测量给出温度差值;采用电能加热的方法使吸收体的温度升高到具有相同的温度差,理论上 X 光的光功率等于电功率。根据加热电流、电阻给出电功率,从而获得 X 光的光功率,然后根据光子能量换算给出光子强度。通过硬 X 光二极管移入后测量得到的电流与移出时光子强度的比值可得到能量灵敏度的实验值,实验不确定度小于 2%。

此外,在上海同步辐射光源上利用自由空气电离室对硬 X 光二极管进行了实验校准。X 光经过空气电离室后产生电子空穴对,其在自由空气电离室加载高压的情况下发生移动并产生电流,利用该原理也可实现对探测器灵敏度的校准。如图 2 所示,使用厂商给定的 0.03 cm 灵敏层厚度,将利用式(2)计算得到的理论值与 PTB 实验室、上海同步辐射光源实验站测量得到的实验结果进行对比,三者之间符合得非常好,而电离室测量得到的不确定度约为 5%,说明校准标准是十分可靠的。

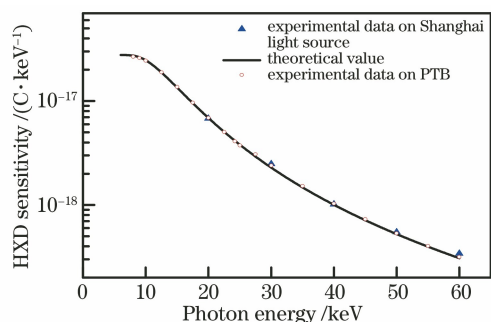


图 2 硬 X 光二极管能量灵敏度的实验数据和理论曲线

Fig. 2 Experimental data and theoretical curves for energy sensitivity of hard X-ray diodes

## 2.2 硬 X 光机校准高灵敏度硬 X 光闪烁探测器

直流硬 X 光机的工作原理:硬 X 光管通过加载 40~120 kV 的高压来加速电子轰击钨材料,这会产生具有钨材料特征荧光和韧致辐射的硬 X 光,硬 X

光通过进一步辐照目标靶可以激发材料的特征荧光,特征荧光通过滤片来过滤除 K 壳层以外其他壳层的荧光以形成准单能的 X 光,单能 X 光入射至硬 X 光闪烁探测器的 NaI 晶体后激发出闪烁的可见光,可见光与探测器中光电倍增管的光阴极作用产生光电子,光电子在高压多级倍增的作用下被放大并以电流的形式输出,使用弱电流计来得到闪烁探测器的能量灵敏度。硬 X 射线源的强度则由校准过的硬 X 光二极管作为标准给出,探测器的灵敏度  $S$  可表示为

$$S(E_k) = \frac{I \times S_0(E_k)}{I_0}, \quad (3)$$

式中: $I_0$  为硬 X 光二极管的电流,单位为 A; $I$  为闪烁探测器的电流,单位为 A; $E_k$  为入射光子的能量,单位为 keV。

以 W 靶为例,本节来确定每种材料所产生的入射光子的能量  $E_k$ 。根据原子辐射跃迁理论,W 材料经 X 光机辐照激发后发射的 K 壳层 X 光以  $K_{\alpha}$ 、 $K_{\beta}$  特征线为主,它们分别表示核外束缚电子由 L 壳层、M 壳层自发辐射跃迁到 K 壳层所产生的特征线。由于电子能级的分裂, $K_{\alpha}$  特征线的精细结构包括  $K_{\alpha 1}$  和  $K_{\alpha 2}$ ,同样  $K_{\beta}$  特征线的精细结构包括  $K_{\beta 1}$  和  $K_{\beta 2}$ 。在 W 原子的密度处于常温下固体的密度时,各条谱线的发射能量及比例都是固定已知的<sup>[18]</sup>,如果能量为 59.3 keV 的  $K_{\alpha 1}$  发射比例为 100%,那么能量为 58.0 keV 的  $K_{\alpha 2}$  发射比例为 57.6%,能量为 67.2 keV 的  $K_{\beta 1}$  发射比例为 33.8%,能量为 69.1 keV 的  $K_{\beta 2}$  发射比例为 8.6%。利用 HPGc 探测器配合多通道脉冲分析仪测量了 W 靶发射的实际能谱,实验上使用 HPGc 探测器测定的能谱  $P(E)$  如图 3(a) 所示,数据处理后的图 3(b) 显示了各个谱线的发射能量及比例都与理论一致。特别注意的是,图 3(b) 中左侧出现了 L 壳层 X 光,其份额虽然很低,但是在一定情况下也需要抑制。

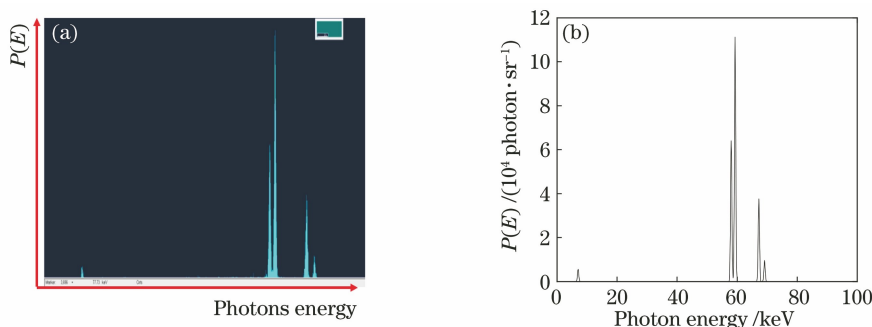


图 3 W 靶的能谱示意图。(a) HPGe 测量的实验能谱;(b)数据处理后的实验能谱

Fig. 3 Energy spectrum diagrams of W target. (a) Experimental energy spectrum for HPGe measurements; (b) experimental energy spectrum after data processing

现将主要的 4 条谱线等效为一个能量点  $E_k$ 。对于 HXD 探测器,根据式(2)可以计算得到探测器的能量灵敏度曲线  $S_0(E)$ ,经数据处理后的能谱  $P(E)$ 为入射 X 光的能谱,如图 3(b)所示。利用平均能量点的计算公式,可以得到  $E_k$  为

$$E_k = \frac{\int_{E=0}^{100} E \times P(E) \times S_0(E) \times dE}{\int_{E=0}^{100} P(E) \times S_0(E) \times dE} \quad (4)$$

对于 HXD 探测器,根据式(4)计算得到 W 靶的  $E_k$  值为 60.0 keV。对于 FFS (Filter Fluorescence Spectrometer)探测器,由于能量灵敏度曲线的不同,计算得到的  $E_k$  值为 60.5 keV,这个变化可以忽略,在后续的灵敏度曲线校准结果中也

会发现 0.5 keV 的差别所带来的灵敏度变化不超过 0.5%。对于其他能量低的目标靶,由于 4 条谱线彼此靠得更近,这个差别会更小。

通过改变硬 X 光机的目标靶材料(Mo、Sn、Dy 和 W 等),可以得到不同能量(17.5, 25.4, 46.2, 60.0 keV 等)下闪烁探测器的能量灵敏度。硬 X 光机校准闪烁探测器能量灵敏度的实验排布如图 4 所示,首先使用 6517A-1 型弱电流计测量硬 X 光二极管探测器的电流信号以溯源硬 X 光源的强度,然后利用可移动平台移出硬 X 光二极管,使用 6517A-2 型弱电流计测量闪烁探测器的电流信号,再根据式(3)计算得到能量灵敏度。需要注意的是,由于测量弱电流会存在统计涨落,为了提高测量精度,应将测量结果设置为 1000 次测量结果的平均值。

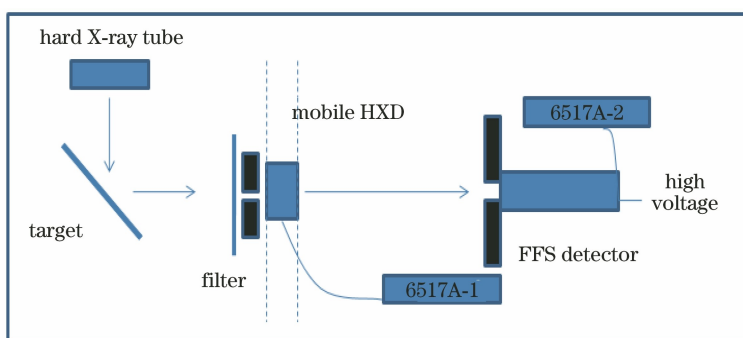


图 4 硬 X 光机校准闪烁探测器能量灵敏度的实验排布示意图

Fig. 4 Schematic of hard X-ray tube to calibrate energy sensitivity of scintillation detector

根据式(3),在固定光子能量  $E_k$  的情况下,两个探测器的电流比值  $I/I_0$ 。理论上为一个不变值。但实际情况下探测器受到目标靶的 L 壳层 X 光、康普顿散射等影响,而且两个探测器在同一光源强度下具有不同的信噪比等,从而导致这个比值为一个变化值,故可以利用这个特性来提高测量的精度,即利用光源的可变性来调节硬 X 光机的输出电流,准

线性地改变光源的强度,利用最小二乘法来拟合得到该比值。依次线性改变直流硬 X 光机的输出电流,在特定光子能量的情况下两个探测器的电流比值如图 5 所示,其中  $T$  为透过率, $k$  为斜率。使用不同种类、厚度的选能滤片来测量能量为 17.5 keV 的 X 光入射至两个探测器所产生的电流比值。选能滤片的设计原则是 K 吸收限略大于光子能量,这

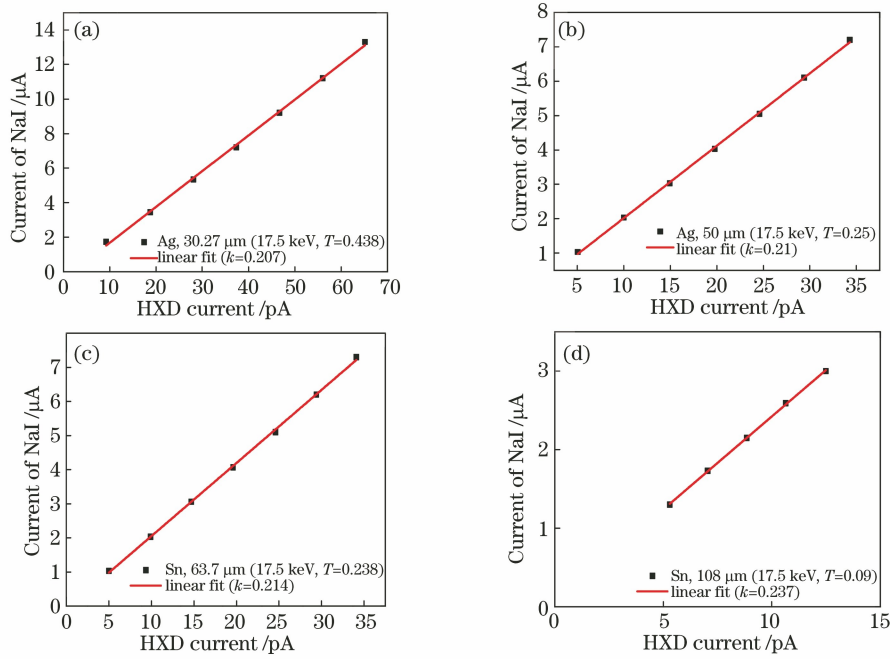


图 5 两个探测器在不同种类、厚度的滤片下的电流比值。(a)厚度为 30.21  $\mu\text{m}$  的 Ag; (b)厚度为 50.00  $\mu\text{m}$  的 Ag; (c)厚度为 63.70  $\mu\text{m}$  的 Sn; (d)厚度为 108.00  $\mu\text{m}$  的 Sn

Fig. 5 Current ratio of two detectors under different types and thicknesses of filters. (a) Ag with thickness of 30.21  $\mu\text{m}$ ; (b) Ag with thickness of 50.00  $\mu\text{m}$ ; (c) Sn with thickness of 63.70  $\mu\text{m}$ ; (d) Sn with thickness of 108.00  $\mu\text{m}$

能够使得在对 L 壳层 X 光进行抑制的情况下 K 壳层所需的 X 光衰减在可接受范围内。

滤片选能会改变光谱的结构及探测器的信噪比,从而造成电流比值的不同。从图 5 可以看到,在透过率  $T$  高于 0.2 的情况下,电流比值在 5% 以内变化,说明校准结果在这个范围内都是稳定可靠的;在透过率  $T$  低于 0.1 的情况下,由于光子能量被衰减得非常厉害,康普顿散射效应所造成的杂散光的占比上升,导致校准结果偏大 10%。在滤片选能的研究中,滤片过薄会造成 L 壳层荧光的占比上升以及出现校准结果显著偏离的现象,因此每个能点处滤片的选择都需要理论计算和多种实验来选择验证。

Geant4 是由欧洲核子中心开发的一款基于蒙特卡罗方法<sup>[19-20]</sup>的光子与物质相互作用的模拟程序,在 10~100 keV 的能量之间光子与物质相互作用忽略电子对效应,仅考虑光电效应和康普顿散射效应。通过该程序计算了 3 mm 晶体厚度、30 mm 晶体直径的圆形 NaI 闪烁探测器的能量灵敏度曲线。实际上,NaI 闪烁探测器由晶体和光电倍增管组成,由于光电倍增管的灵敏度在正常工作区间是线性放大的,所以其与能量值没有关系,故理论上给出的 NaI 晶体曲线与实验校准的探测器能量灵敏

度曲线存在一个固定的比例,因此基于本文校准方法给出了典型 NaI 闪烁探测器能量灵敏度的实验结果,再使用固定比例的理论曲线来拟合实验数据,结果如图 6 所示。从图 6 可以看到,实验结果与理论计算结果拟合得非常好,这可以通过对 4 个能量点处灵敏度的校准来得到能量为 10~100 keV 的整条曲线。如果选取更多的目标靶,那么使用更多的点来拟合曲线可以进一步提高精度。

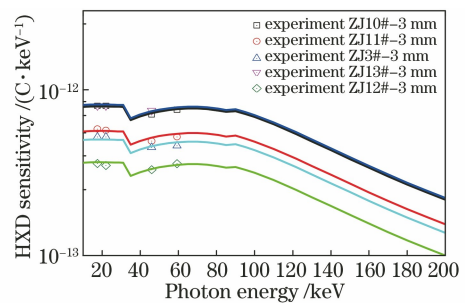


图 6 典型 NaI 闪烁探测器灵敏度的实验结果与理论计算结果

Fig. 6 Experimental results and theoretical calculation results of typical NaI scintillation detector sensitivity

根据式(3)可以得到探测器校准不确定度  $u_s$  的计算公式,即

$$u_s = \sqrt{u_{I_1}^2 + u_{S_0}^2 + u_{I_0}^2}, \quad (5)$$

式中:  $u_I$  为闪烁探测器的电流不确定度, 主要由硬 X 光机的稳定性、弱电流计的测量不确定度、选能滤片所引起的 L 壳层荧光和康普顿散射效应等因素联合确定, 不确定度为 3%;  $u_{S_0}$  为标准 HXD 探测器的能量灵敏度不确定度, PTB 的实验室给出其值小于 2%;  $u_{I_0}$  为标准 HXD 探测器的电流不确定度, 主要由硬 X 光机的稳定性、弱电流计的测量不确定度、选能滤片所引起的 L 壳层荧光和康普顿散射效应等因素联合确定, 由于 HXD 探测器的灵敏度比闪烁探测器更低, 因此目前的实验条件仅能达到 6%。

根据式(5)可以计算得到总的校准不确定度小于 7%, 综上所述可以看到校准不确定度主要由 HXD 探测器的灵敏度过低导致 L 壳层荧光与康普顿散射互相竞争造成, 因此未来可以探索提高 HXD 探测器的能量灵敏度以进一步提高校准方法的精度。

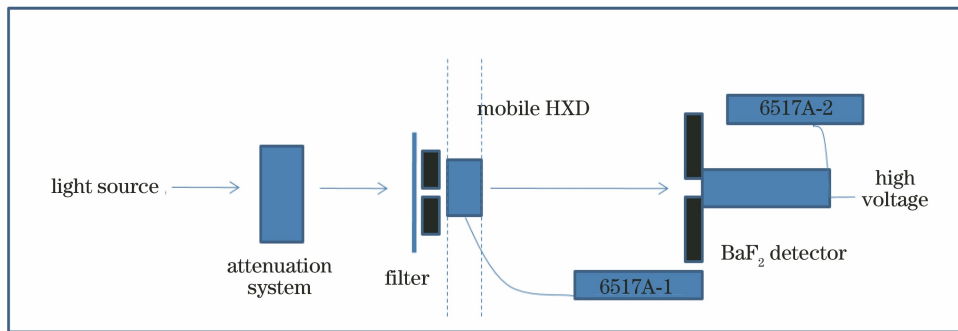


图 7 上海同步辐射光源校准 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器能量灵敏度的实验排布示意图

Fig. 7 Schematic of experimental arrangement for calibration of BaF<sub>2</sub> scintillation detector energy sensitivity by Shanghai synchrotron radiation source

类似地, 通过改变多层 Al 衰减系统的厚度即可改变光源强度, 此时两个探测器的信号会发生相应变化, 利用式(3)和最小二乘法在上海同步辐射装置上实现了对低灵敏度、高时间分辨 BaF<sub>2</sub> 探测器灵敏度的校准。ICF(Inertial Confinement Fusion) 实验中探测器可能加载不同的高压以满足诊断要求, 因此还需要确定探测器的输出信号与加载高压之间的关系, 同时也能验证探测器的线性特性。理论表明探测器的输出信号与探测器的高压满足

$$\ln G = \ln B + k \times \ln H, \quad (6)$$

式中:  $G$  为信号增益;  $B$  为探测器固有的本底噪声;  $H$  为探测器的加载高压。斜率  $k$  与探测器的类型及结构相关。

信号增益的对数与高压的对数呈线性相关, 而信号增益与 BaF<sub>2</sub> 探测器的灵敏度成正比。12 号 BaF<sub>2</sub> 探测器在光源能量点(55 keV)处灵敏度的校

### 2.3 同步辐射校准低灵敏度硬 X 光闪烁探测器

由于硬 X 光机不能满足低灵敏度探测器校准所需的高光源强度, 因此利用基于半导体硬 X 光二极管的方法在上海同步辐射光源装置上开展了低灵敏度、高时间分辨的 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的校准实验。上海同步辐射光源是第三代同步辐射光源, 储存环的电子能量为 3.5 GeV, 束流强度为 800 mA, 其中 BL13W 型光束线是一条硬 X 光束线, 其能量范围为 8~72 keV, 单色性好, 能量分辨率优于  $5 \times 10^{-3}$ , 具备硬 X 光束在线监测的能力<sup>[21]</sup>, 单位时间内能量为 20 keV 的硬 X 光源强度为  $5 \times 10^{10}$  photon/mm。上海同步辐射光源校准 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器能量灵敏度的实验排布如图 7 所示, 将由上海同步辐射光源出射的硬 X 光通过一个多层 Al 衰减系统来调节其为合适的强度, 以用于低灵敏度 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的校准实验。

准实验结果如图 8(a) 所示, 其中  $r$  为线性相关系数。

通过实验给出了该光电倍增管的结构常数为 6.67, 该常数在光电倍增管结构不发生改变时是相对稳定的, 因此在较长时间周期内只需要校准某个电压处的灵敏度, 该探测器的灵敏度在 1100~2600 V 的电压之间都能够通过式(6)推得。实验还证明探测器在输出电流为 0.2~45.0  $\mu$ A 时可以保持非常好的线性特性, 说明探测器的动态范围至少高于 225。

通过校准实验获得了低灵敏度、高时间分辨的 BaF<sub>2</sub> 探测器的灵敏度, 结果如图 8(b) 所示。从图 8(b) 可以看到, BaF<sub>2</sub> 探测器的灵敏度比 NaI 探测器低至少两个量级, 与预期相符; 由蒙特卡罗模拟程序 Geant4 计算得到的结果与实验结果在趋势上保持一致, 在 20 keV 能量以上两者符合得较好, 在

20 keV 能量以下灵敏度的计算值偏高,其原因在于该类型的晶体封装层存在除 Al 以外的其他元素,

另外空气对于 20 keV 能量以下 X 射线的衰减也是非常重要的,这些问题需要进一步研究。

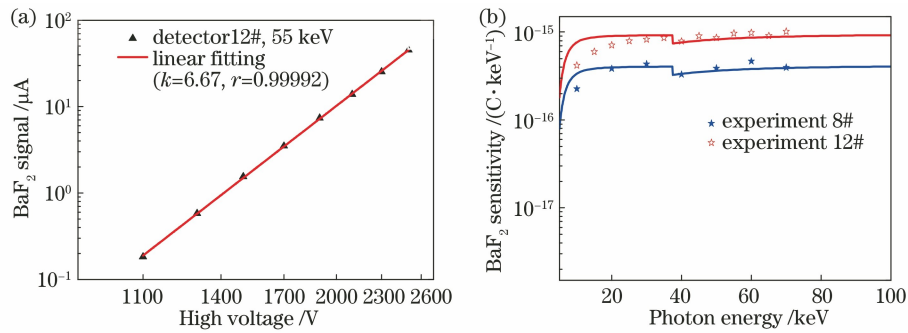


图 8 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的性能曲线。(a) BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的输出信号与高压的关系;  
(b) 典型 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器灵敏度的校准结果与理论计算结果

Fig. 8 Performance curves of BaF<sub>2</sub> scintillation detector. (a) Relationship between output signal of BaF<sub>2</sub> scintillation detector and voltage; (b) calibration results and theoretical calculation results of typical BaF<sub>2</sub> scintillation detector sensitivity

### 3 实验应用

基于半导体硬 X 光二极管标准的方法不使用放射源,校准过程十分简便,尤其在硬 X 光机上使用时,仅控制程序移动标准探测器和更换靶材料就可以实现在不同 X 光能量下对硬 X 光探测器灵敏度的校准。半导体硅的灵敏层稳定且抗辐照,其灵敏度可以在数年内基本保持不变。待校准的 NaI 闪烁探测器由于本身存在潮解效应,则需要每年进行一次校准,而 BaF<sub>2</sub>、CdTe 等其他性质较稳定的探测器可以在更长的时间周期内保持灵敏度稳定。原理上,基于半导体硬 X 光二极管标准的方法可以用于各种滤片能量透过率、晶体衍射效率、硬 X 光探测器灵敏度等物理量的精密定量校准。天文领域使用的硬 X 光探测器<sup>[22-23]</sup>也特别关注硬 X 光在 10~100 keV 能量之间的定量测量,医学照相使用的 X 光能量一般也处在该区间,定量分析 X 射线断层成像图像也可能涉及灵敏度的校准,这些领域都有潜在的应用前景。

目前,基于半导体硬 X 光二极管标准的方法可校准 ICF 实验滤波荧光谱仪前真空隔离片的能量透过曲线。真空隔离片能量透过率的理论计算结果与实验结果如图 9 所示。根据真空隔离片的材料成分、厚度,由 XOP 软件计算的结果与实验结果在 3% 的不确定度以内一致,证明了该校准方法的高精度和稳定性。

较高灵敏度的 NaI 闪烁探测器的校准数据已在 FFS 上得到了大量应用,本文主要介绍低灵敏度、高时间分辨的 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的校准数据在

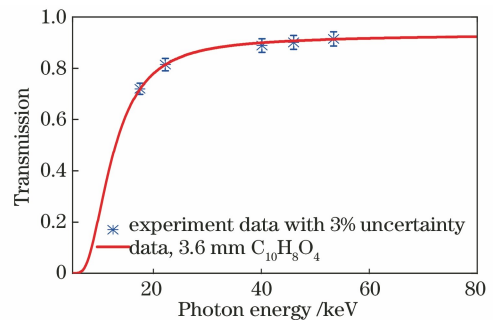


图 9 真空隔离片能量透过率的理论计算结果与实验结果  
Fig. 9 Theoretical and experimental results of energy transmittance of vacuum isolator

FFS 上应用的最新进展。基于低灵敏度 BaF<sub>2</sub> 探测器的精密校准数据,2021 年本课题组在某大型激光装置上开展了高亮度硬 X 光源的实验研究。实验利用 48 束高功率激光辐照黑腔靶,每束激光的能量为 2000 J,脉冲宽度为 2 ns,频率为 351 nm,最终构建出能量在 50 keV 附近的高亮度硬 X 光源。本文同时使用滤片堆栈谱仪(FSS)<sup>[24]</sup>和 FFS 进行比对测量,实验结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,超热电子温度为 17.9 keV,两种诊断方式的数据吻合,在 50 keV 能量附近单位立体角的硬 X 光强度超过  $10^{13}$  photon · sr<sup>-1</sup>,由此可知目前此类装置得到了很好的结果。优化激光和黑腔参数后硬 X 光强度进一步提升,这有望实现在各种目标的硬 X 光康普顿散射成像中将硬 X 光强度作为高亮度背光源。

### 4 结 论

针对 ICF 实验中硬 X 光能谱的诊断核心元件

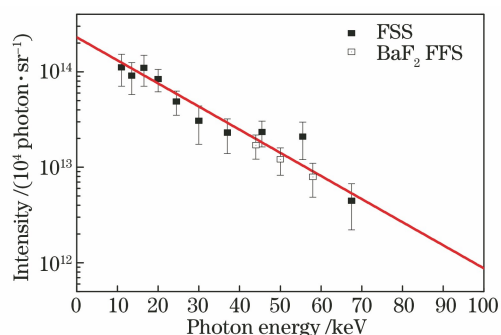


图 10 滤片堆栈谱仪与 BaF<sub>2</sub> 滤片荧光谱仪的数据比较

Fig. 10 Comparison of data of filter stack spectrometer and BaF<sub>2</sub> filter fluorescence spectrometer

闪烁探测器,本文建立了一种基于半导体硬 X 光二极管标准的校准方法,该方法解决了放射源方法在量值溯源过程中存在的较大不确定度。校准方法同时还具有简便、快速的优点,未来计划建立本校准实验方法的程序自动化控制系统,使系统具备自动切换目标靶和智能校准的功能,有望大幅度提高校准数据的获取能力。在此基础上获得了目前在用的低灵敏度、高灵敏度两种闪烁探测器的校准实验数据,使用蒙特卡罗程序 Geant4 理论计算两种闪烁探测器的校准数据。实验结果表明,实验数据具有较高的可靠性。不确定度分析结果表明,校准结果的总不确定度为 7%,较常规的放射源方法有显著提高,尤其是低灵敏度、高时间分辨 BaF<sub>2</sub> 闪烁探测器的校准数据,其可以为将来更高功率激光与等离子体在非线性和相互作用下产生强超热电子源、高亮度硬 X 光源的研究提供技术基础。在充分研究硬 X 光源性能、半导体硅灵敏层厚度、半导体种类等影响因素的情况下,有望进一步提高校准精度,从而提升 ICF 实验中硬 X 光能谱的精密诊断能力,基于半导体硬 X 光二极管标准建立的精密校准平台还具有在天文、医学等其他领域的潜在应用前景。

**致谢** 感谢上海同步辐射光源光束线站、中国科学院高能物理研究所、中国工程物理研究院激光聚变研究中心等相关单位的同事和朋友的大力帮助。

### 参 考 文 献

- [1] Kruer W L. The physics of laser plasma interactions [M]. Upper Saddle River: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1988: 96-108.
- [2] Kostenko O F, Andreev N E, Rosmej O N. X-rays diagnostics of the hot electron energy distribution in the intense laser interaction with metal targets [J].

Physics of Plasmas, 2018, 25(3): 033105.

- [3] Döppner T, Dewald E L, Divol L, et al. Hard X-ray (>100 keV) imager to measure hot electron preheat for indirectly driven capsule implosions on the NIF [J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10E508.
- [4] Cui Y Q, Wang W M, Sheng Z M, et al. Laser absorption and hot electron temperature scalings in laser-plasma interactions [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2013, 55(8): 085008.
- [5] 赵宗清, 闫永宏, 何晟, 等. 利用韧致辐射谱回推超热电子温度 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 241-244.
- Zhao Z Q, Yan Y H, He S, et al. Scaling method of hot electron temperature using bremsstrahlung spectra [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 241-244.
- [6] 李三伟, 祁兰英, 易荣清, 等. 激光聚变中硬 X 光能谱回推方法 [J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(2): 205-210.
- Li S W, Qi L Y, Yi R Q, et al. A unfolding of hard X ray spectrum in laser fusion [J]. High Power Laser & Particle Beams, 1995, 7(2): 205-210.
- [7] McDonald J W, Kauffman R L, Celeste J R, et al. Filter-fluorescer diagnostic system for the National Ignition Facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3753-3755.
- [8] Bruns H C, Emig J A, Thoe R S, et al. Filtered fluorescer X-ray detector [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2519: 1-9.
- [9] 何小安, 杜华冰, 李朝光, 等. 同步辐射标定闪烁体探测器灵敏度 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1575-1578.
- He X A, Du H B, Li C G, et al. Scintillator's sensitivity calibration method in synchrotron radiation facility [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1575-1578.
- [10] 何小安, 李朝光, 易荣清, 等. 单光子计数闪烁探测器灵敏度标定方法 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 032022.
- He X A, Li C G, Yi R Q, et al. Sensitivity calibration of NaI (Tl) scintillator based on single photon counting [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 032022.
- [11] Zhu Y X, Lu J B, Li X B, et al. Calibration of the energy response matrix for X-ray detector CCD236 [J]. Journal of Instrumentation, 2021, 16(5): P05016.
- [12] Song R Q, Wu J J, Lai W C, et al. Research on performance of hard X-ray calibration device in low energy section [C] // 2019 14th IEEE International



- Conference on Electronic Measurement & Instruments, November 1-3, 2019, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2019: 1588-1592.
- [13] Ren G Y, Wu J J, Zhai Y D, et al. Preliminary calibration of the hard X-ray imager LaBr<sub>3</sub> probe[C]// 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, November 1-3, 2019, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2019: 1369-1374.
- [14] Lee J, Haugh M, LaCaille G, et al. Calibrating of X-ray detectors in the 8 to 111 keV energy range and their application to diagnostics on the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8505: 850508.
- [15] Barbui T, Delgado-Aparicio L F, Pablant N, et al. Multi-energy calibration of a PILATUS<sub>3</sub> CdTe detector for hard X-ray measurements of magnetically confined fusion plasmas[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(2): 023105.
- [16] Ali Z, Pond T, Buckles R A, et al. A review of X-ray diagnostic calibrations in the 2-100keV region using the high energy X-ray calibration facility (HEX) [EB/OL]. [2021-02-03]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1012659/>.
- [17] Stoeckl C, Theobald W, Regan S P, et al. Calibration of a time-resolved hard-x-ray detector using radioactive sources [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E323.
- [18] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 3 版. 北京: 原子能出版社, 1997.
- Wu Z H. Experimental methods of nuclear physics [M]. 3rd ed. Beijing: Atomic Press, 1997.
- [19] Kim W, Jang J, Kim D H. Monte Carlo simulation for the analysis of various solid samples using handheld X-ray fluorescence spectrometer and evaluation of the effect by environmental interferences [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2021, 180: 106203.
- [20] Guthoff M, Brovchenko O, de Boer W, et al. Geant4 simulation of a filtered X-ray source for radiation damage studies [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 675: 118-122.
- [21] 胡哲, 洪春霞, 滑文强, 等. 上海光源硬 X 射线光束在线监测 [J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1534001.
- Hu Z, Hong C X, Hua W Q, et al. Online monitoring of hard X-ray beam at SSRF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1534001.
- [22] Zhang P, Wojtek H, Liu S M, et al. In-flight low energy X-ray calibration of POLAR detector on TianGong2 [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2020, 44(1): 87-104.
- [23] Pavlinsky M, Tkachenko A, Levin V, et al. The ART-XC telescope on board the SRG observatory [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 650: A42.
- [24] 于明海, 谭放, 闫永宏, 等. 用于激光产生的高能 X 射线源能谱诊断的滤片堆栈谱仪的研制 [J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(6): 1090-1095.
- Yu M H, Tan F, Yan Y H, et al. Development of filter stack spectrometer for spectrum measurement of X-ray generated by laser [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(6): 1090-1095.