

高次谐波份额测量滤片法及其应用

孙 奥, 杜华冰*, 侯立飞, 尚万里, 车兴森, 张文海, 韦敏习, 杨国洪,
易荣清, 杨轶濛, 江少恩, 王 峰, 杨家敏

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 惯性约束聚变实验对数据测量精度有着很高的要求, 诊断设备需要向绝对测量的方向发展, 对标定提出了很高的要求。北京同步辐射装置 (BSRF) 提供了良好的标定光源, 其光源特性, 如高次谐波份额的数值研究, 对标定工作和 ICF 精密诊断十分重要。通过测量 BSRF 上 4B7B 光束线的软 X 射线源上带有或不带有滤片的标准探测器的电流, 研究了不同滤片对单色 X 射线的透射率曲线, 并建立了拟合的理论透射率曲线。根据数据分析, 计算出单色光源中二次谐波的比例。实验结果显示, 二次谐波在软 X 射线能段主要集中在 180~300 eV 以及 450~800 eV, 所占份额大部分在 15% 以下, 最大可达到 25% 左右。利用测量的高次谐波份额, 开展了对平响应滤片透过率以及 X 射线二极管灵敏度的修正工作, 修正后的结果和理论相符, 极大地提高了诊断设备精密诊断能力。完整的理论模型和实验相互验证, 说明基于滤片的高次谐波份额测量技术目前已经成熟并且具有广阔的应用前景。

关键词: 惯性约束聚变; 同步辐射; 标定; 高次谐波

中图分类号: O536 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200072

Filter-based technology for evaluating proportions of high-order harmonics and its application

Sun Ao, Du Huabing*, Hou Lifei, Shang Wanli, Che Xingsen, Zhang Wenhai, Wei Minxi,
Yang Guohong, Yi Rongqing, Yang Yimeng, Jiang Shaoen, Wang Feng, Yang Jiamin

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to meet the high requirements of the data measurement in the inertial confinement fusion(ICF) experiment, experimental instruments must be developed in the direction of absolute measurement, and the requirements for calibration are also higher. Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) provides a good X-ray source for calibration in China. The characteristics of the light source, such as the numerical study of the high-order harmonics content, are very important for the calibration work and the precise diagnosis of ICF. By measuring the current of a standard detector with or without a filter on a soft-X-ray source of beam line 4B7B in BSRF, the transmittance curves of different filters for monochromatic X-ray were studied and a fitted theoretical transmission curve was established. According to this, the proportion of second harmonic in the monochromatic light source was calculated. The results show that the second harmonic in the soft X-ray energy segment is mainly concentrated in the 180-300 eV and 450-800 eV, the share is mostly 15% below, the maximum can reach about 25%. Then, the calibration of the flat-response filter transmittance and the X-ray diode sensitivity was corrected

收稿日期:2020-02-26; 修订日期:2020-04-18

基金项目:中国工程物理研究院科学基金(YZJLX2016007);国家自然科学基金(11775203)

作者简介:孙奥(1995-),男,研究实习员,本科,主要从事 X 射线线谱诊断方面的研究。Email: sunao2013@163.com

通讯作者:杜华冰(1979-),男,助理研究员,硕士,主要从事 X 射线辐射能流诊断方面的研究。Email: duhb@outlook.com

using the calibration results. The revised results are consistent with the theory, which greatly improves the precision diagnosis capability of the diagnostic equipment. The complete theoretical model and experiment results mutual verify, showing that the filter-based technology for evaluating proportions of high-order harmonics is currently mature and has broad application prospects.

Key words: inertial confinement fusion; synchronous radiation; calibration; high-order harmonics

0 引言

在间接驱动惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 研究中, 激光驱动产生的黑腔辐射源特性十分重要^[1-4]。激光与黑腔相互作用形成等离子体, 并辐射出 X 射线。通过对 X 射线能谱和强度的诊断, 可实现对激光与物质相互作用、等离子体中原子物理过程及高温物质的特性的诊断。因此, X 射线辐射的精密测量是 ICF 诊断的核心之一。用于表征 X 射线的诊断仪器中, X 射线二极管 (X-ray diodes, XRD) 的运用是极其广泛的, 从其最初发明至今, 在世界各国的 ICF 诊断中都担当着十分重要的角色^[5-7]。目前实验中使用的系统大多是滤波法, 即滤波-X 射线二极管系统进行测量, 其能量响应函数为:

$$F(\varepsilon) = \eta(\varepsilon)\mathbb{S}(\varepsilon) \quad (1)$$

在 XRD 使用之前需要对滤片的透过率曲线 $\eta(\varepsilon)$ 以及 XRD 的能量响应灵敏度曲线 $\mathbb{S}(\varepsilon)$ 进行标定, 之后才能应用到实际中。早期的标定采用 Henke 源和质子荧光源, 但是质量都达不到要求。同步辐射光源具有高强度、准直性好、高稳定性、具有脉冲时间特性等优点, 是标定光源十分理想的选择。

同步辐射提供的标定光源不能维持绝对的稳定, 需要提前研究其光源的性能, 包括光源的光斑、强度、单色性和高次谐波。其中, 对于高次谐波的标定是一项很重要的工作。同步辐射光源光束线上的分光原件多数采用光栅和晶体, 虽然理想出光为单色光, 但是不可避免会掺杂高频光, 这种高频光统称高次谐波。高次谐波势必对标定实验的精确度产生影响, 需要采用方法进行消除。传统的方法是直接在不同的能区加不同滤片, 根据滤片本身在 K 边或 L 边的吸收突变实现在透过基波同时对高次谐波进行吸收, 以此实现对高次谐波的抑制。北京同步辐射和激光聚变研究中心共同建立了一个专用于标定的束线站, 其中针对高次谐波进行了调试, 改善了光源特性, 并且开展了性能研究^[8-9]。由于同步辐射装置本身的不稳定

性以及光学元器件的损耗^[10], 在每次开展正式标定实验之前, 仍需要对光源的高次谐波进行数值研究。

高次谐波是客观存在的, 在光源中不能完全消除, 高次谐波的标定只能给出其相对于不同能量的基波的比例系数, 然后根据标定的高次谐波比例系数对其他标定 (如滤片、XRD 探测器阴极等) 的数据进行修正, 消除高次谐波影响的份额。之前能够使用的唯一的标定方法是使用透射光栅, 利用透射光栅的衍射分光以及 CCD 的成像分析, 得到高次谐波所占份额^[8,11]。这样的测量方法虽然很直观, 但是在实际运用中会占用大量的时间去测量以及分析处理数据, 浪费宝贵的标定资源, 所以需要开发一种更加高效而且准确的高次谐波标定方法, 提高整个标定流程的效率。前文提到滤片的透过率曲线 $\eta(E)$ 的标定, 滤片本身是 F-XRD 的一部分, 通过分析, 在忽略三次及以上高次谐波的影响下, 通过对实验标定中测量得到的滤片透过率与滤片理论透过率进行计算, 能直接得到单色光源中二次谐波所占份额。分析之前使用透射光栅对同步辐射单色光源进行标定得到的数据, 其中三次及以上高次谐波份额很少, 同时, 更高次谐波对 XRD 的灵敏度影响较小, 所以这样的忽略在实验中是可行的。在正式标定中, 滤片对高次谐波份额的标定得到了很好的数据, 使用高次谐波标定数据对 XRD 灵敏度的标定进行了修正, 证明这个方法是可行的。

1 原理

实验中对于滤片的标定属于整个标定实验的一部分, 不仅可以用于计算高次谐波份额, 也可以准确表征滤片的厚度。滤片的理论透过率对于纯单色光是比较准确的, 但是实际标定数据往往和理论数据在某些能段相差较大, 主要是因为高次谐波的存在。在实验中需要用到滤片对于单色光的透过率, 所以标定之后需要使用最小二乘法进行拟合确定滤片的理论面密度 σ ^[12]。标定之后的滤片用于 XRD 前端作为滤光片, 而在高次谐波标定中, 使用拟合后的面密度 σ , 根据

$$\eta(\varepsilon) = e^{-\mu(\varepsilon)\sigma} \quad (2)$$

得到不同能量下滤片的理论透过率 (真实透过率) $\eta(\varepsilon)$, 其中 $\mu(\varepsilon)(\text{cm}^2\text{g}^{-1})$ 表示该种材料在不同能点的吸收系数, 直接使用数据库标准数据。

在计算中假设“单色光”光源没有能散, 其能谱峰的半高宽为 0。所以设光源谱分布为:

$$n(\varepsilon) = \int_0^\infty \left[n_1(\varepsilon)\delta(\varepsilon - \varepsilon_1) + n_2(\varepsilon)\delta(\varepsilon - 2\varepsilon_1) + n_3(\varepsilon)\delta(\varepsilon - 3\varepsilon_1) + \dots \right] d\varepsilon \quad (3)$$

式中: $n_1(\varepsilon_1)$ 表示基频波的强度; $n_2(\varepsilon_1)$ 表示二次谐波的强度, 以此类推。

通过之前对 4B7B 束线在经过高次谐波抑制处理之后的性能研究^[8], 发现在经过单色器以及抑制镜箱之后, “单色光”的三次及更高次谐波份额已经极小。并且实际上, 三次谐波对 XRD 的影响是较小的, 因为 XRD 的灵敏度除了吸收边处突变, 一般随着能量的提高在降低, 高次谐波对基波的影响也降低, 在实际的 XRD 标定中对于三次及更高次谐波的影响一般不考虑, 所以不用计算三次及以上谐波份额。综上所述, 在误差可接受范围内, 滤片标定中忽略三次及更高次谐波进行计算。故将光源谱分布写为:

$$n(\varepsilon) = \int_0^\infty [n_1(\varepsilon)\delta(\varepsilon - \varepsilon_1) + n_2(\varepsilon)\delta(\varepsilon - 2\varepsilon_1)] d\varepsilon \quad (4)$$

在上述条件下, 原理如图 1 所示。设标准探测器对能量为 ε 的光子的灵敏度为 $S(\varepsilon)$, 表示为:

$$S(\varepsilon) = \frac{I(\varepsilon)}{E(\varepsilon)} \quad (5)$$

式中: $I(\varepsilon)$ 表示标准探测器测量电流; $E(\varepsilon)$ 表示单位时间沉积在标准探测器灵敏面上的光子能量。由于光

源往往不是单色的, 所以实际的探测器电流需要在能谱上进行积分。根据透过率的定义, 分别测量出在同步辐射光源后端有、无滤片情况下标准探测器的电流读数, 电流读数的比值就是滤片的透过率。知道标准探测器的灵敏度分布 $S(\varepsilon)$ 之后, 结合滤片理论透过率 $\eta(\varepsilon)$ 以及光源谱分布 $n(\varepsilon)$, 理论上滤片的实测透过率为:

$$\beta(\varepsilon_1) = \frac{I_1(\varepsilon_1)}{I_0(\varepsilon_1)} = \frac{\int_0^\infty [n_1(\varepsilon)\delta(\varepsilon - \varepsilon_1) + n_2(\varepsilon)\delta(\varepsilon - 2\varepsilon_1)] \varepsilon S(\varepsilon) \eta(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^\infty [n_1(\varepsilon)\delta(\varepsilon - \varepsilon_1) + n_2(\varepsilon)\delta(\varepsilon - 2\varepsilon_1)] \varepsilon S(\varepsilon) d\varepsilon} = \frac{n_1(\varepsilon_1)\varepsilon_1 S(\varepsilon_1)\eta(\varepsilon_1) + n_2(\varepsilon_1)2\varepsilon_1 S(2\varepsilon_1)\eta(2\varepsilon_1)}{n_1(\varepsilon_1)\varepsilon_1 S(\varepsilon_1) + n_2(\varepsilon_1)2\varepsilon_1 S(2\varepsilon_1)} = \frac{n_1(\varepsilon_1)\eta(\varepsilon_1)S(\varepsilon_1) + 2n_2(\varepsilon_1)\eta(2\varepsilon_1)S(2\varepsilon_1)}{n_1(\varepsilon_1)S(\varepsilon_1) + 2n_2(\varepsilon_1)S(2\varepsilon_1)} \quad (6)$$

式中: $\beta(\varepsilon_1)$ 就是滤片对单光子能量为 ε_1 的“单色光”实际测量的透过率; $I_0(\varepsilon_1)$ 和 $I_1(\varepsilon_1)$ 表示加滤片前后的探测器电流读数; $n_1(\varepsilon_1)$ 、 $n_2(\varepsilon_1)$ 分别表示光源谱分布中基频波和二次谐波的强度 (单位时间光子数); $\eta(\varepsilon_1)$ 、 $\eta(2\varepsilon_1)$ 分别表示滤片对基频波及二次谐波的透过率。根据公式 (6), 通过已知或者已测量的数据, 算出二次谐波与基频波强度的比值:

$$R(\varepsilon_1) = \frac{n_2(\varepsilon_1)}{n_1(\varepsilon_1)} = \frac{\beta(\varepsilon_1) - \eta(\varepsilon_1)}{\eta(2\varepsilon_1) - \beta(\varepsilon_1)} \frac{S(\varepsilon_1)}{2S(2\varepsilon_1)} \quad (7)$$

二次谐波份额的不确定度为:

$$\frac{\Delta R(\varepsilon_1)}{R(\varepsilon_1)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S(\varepsilon_1)}{S(\varepsilon_1)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S(2\varepsilon_1)}{S(2\varepsilon_1)}\right)^2 + \left[\frac{1}{\beta(\varepsilon_1) - \eta(\varepsilon_1)} + \frac{1}{\eta(2\varepsilon_1) - \beta(\varepsilon_1)}\right] \Delta\beta(\varepsilon_1)}^2 \quad (8)$$

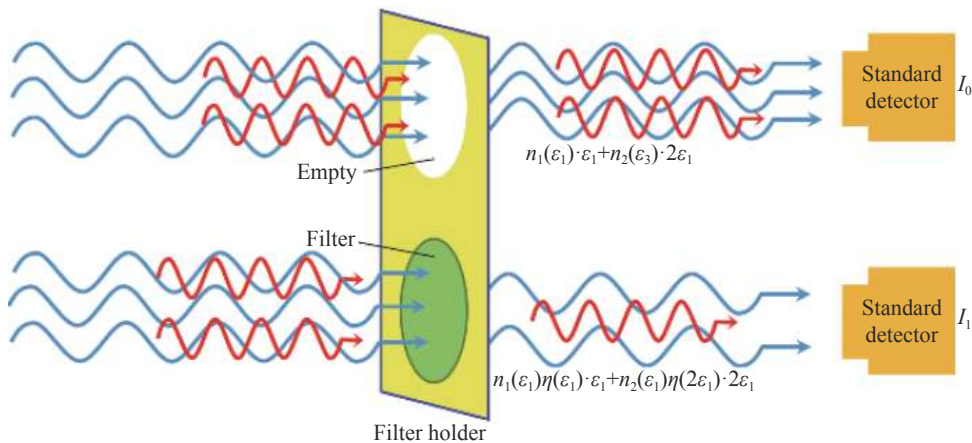


图 1 滤片标定原理简图

Fig.1 Filter calibration principle diagram

式中： $\Delta S(\epsilon_1)$ 代表标准探测器的绝对不确定度； $\Delta\beta(\epsilon_1)$ 代表滤片实测透过率的绝对不确定度。在标准探测器的性质稳定情况下，从公式(8)看出， $|\eta(2\epsilon_1) - \beta(\epsilon_1)|$ 越大，不确定度越小，处理的结果越好，所以需要选择透过率动态范围大的滤片进行标定。

2 实验及装置

实验标定使用的束线是北京同步辐射光源的 4B7B 软 X 射线标定束线，图 2 是实验装置设定简图

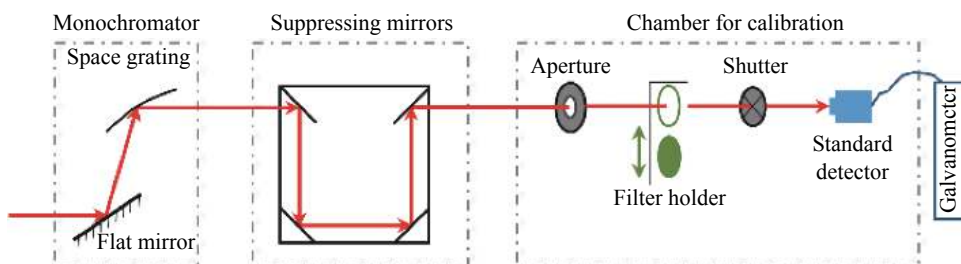


图 2 标定实验光路简图 (红色箭头代表激光方向, 绿色箭头代表可上下移动)

Fig.2 Calibration experiment light path diagram (The red arrow represents the laser direction and the green arrow represents the up and down movement)

实验要求精度高的准直，准直要保证三点——前端限光光阑 (2 mm)、后端玻璃法兰正中心、中间样品位一系列限孔 (5 mm)——共线。要求在一系列样品限位孔移动过程中，标定光源能够完全过孔，获得完整的荧光光斑，保证最后标准探测器获得完整、具有可对比性的数据。同时对于样品 (滤片) 的离线安装也有要求，安装前进行筛选和控制，剔除偏心超过 1 mm 的滤片，控制滤片盒尺寸公差。如果出现了样品不对心情况，在安装时将样品的不对称方位放置在上下 (纵向) 位，通过下一步操作确定滤片中心位置。之后通过平台区扫描，根据平顶的数据，定下滤片中心。

然后使用确定的滤片中心，配合快门的使用，开始灵敏度的标定。通过滤片架的移动，实现标准探测器在有滤片情况下对 X 光强度的探测，由两种情况得到的电流的比值得到滤片的透过率曲线。得到实测透过率曲线之后，通过最小二乘法进行拟合，得到滤片的理论透过率曲线。使用理论透过率曲线与实测透过率曲线的数据，根据公式(7)，通过 Matlab 对数据进行处理，得到二次谐波和基波份额之比，实现二

以及激光光路简图。其中单色器使用多种光学镜片组成，图中平场光栅和平面镜为单色器主要元器件，实现在宽谱模式下变包含角扫描，在高分辨模式下固定包含角扫描。4B7B 束线经过单色器之后“过滤”了一些高次谐波，但是之后出射的单色光仍然带有份额不低的高次谐波，之后经过抑制镜箱，里面有高次谐波抑制镜，进一步抑制一部分高次谐波。最后束线进入标定靶室标定，靶室中可以实现有无滤片的选择以及滤片的更换。

次谐波份额的标定。

实验中选取 C 滤片作为高次谐波份额标定的滤片，一是因为 C 滤片相对于其他金属滤片，制作厚度较厚，制备工艺成熟且稳定，表面平整性好；二是因为实验中 C 滤片对于单色光的透过率曲线和理论符合很好、重复性高，可以作为标准标定的理想材料；三是因为 C 滤片在软 X 光能段的透过率动态范围很大，根据公式(8)，选取 C 滤片可以减小标定结果的不确定度。

定量测量设备的标定需要对标定使用的标准探测器进行严格的检定，北京同步辐射使用的标准探测器以及电流计每年标定实验前都需要经过国际标准的校准检定。其中弱电流计由中国泰克科技进行校准并出具校准数据报告，标准探测器由德国 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 进行校准并出具校准数据报告，其中对于标准探测器的校准数据报告中包含探测器对单色 X 光的响应数据，即 $S(\epsilon)$ 。

最后，根据需要，对本轮实验选定的滤片进行复标 (多次测量)，既可以确定状态，又能对标定效果进行考核，考察基于滤片透过率标定实验评估高次谐波

份额技术的稳定性。

3 标定结果与应用

通过对标准数据库的拟合分析,确定 C 滤片的理论面密度 ($3.30 \times 10^{-4} \text{gcm}^{-2}$), 得到理论透过率曲线。图 3 显示了拟合后的理论透过率曲线 (图中红色实线) 和实测透过率曲线 (图中黑色实线) 的对比。从图中看出, 在 180~300 eV 区间内, 实测透过率与理论透过率存在差异, 在吸收边位置, 理论与实测符合的很好。在 450~800 eV 区间内, 实测透过率比理论透过率明显大, 最大处透过率相差 10% 左右。这是因为在 450~800 eV 能区内, 滤片的透过率本来很低, 但是由于基波中含有份额不低的二次谐波, 其能量在 900~1 600 eV, 滤片对这一能区的 X 射线的透过率较高, 所以实测透过率比理论透过率高很多。在大于 800 eV 之后的能区, 理论与实际的透过率曲线符合得很好。利用公式 (7), 通过 Matlab 程序进行计算, 得到光源的二次谐波份额如图 3 绿色实线所示。从计算结果得到, 在 300 eV 附近, 二次谐波的份额最大, 达到了 26%, 所以二次谐波在某些能段的影响比较大。在 180~300 eV 以及 450~800 eV 的范围内, 二次谐波比例都很明显, 集中在 10% 左右, 但是在其他区域的份额趋近于零。结果的可靠性通过后续对平响应滤片透过率以及 XRD 灵敏度的修正来反向验证。

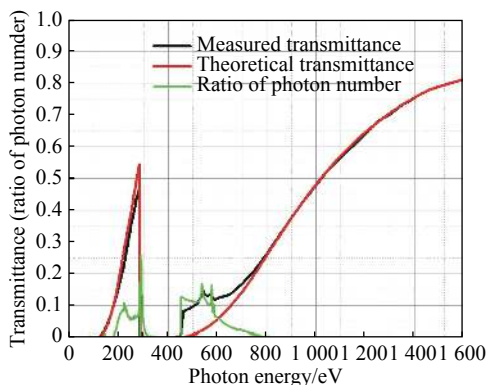


图 3 C 滤片理论透过率拟合及二次谐波估算

Fig.3 Theoretical transmittance fitting of C filter and the proportion of second harmonic

得到二次谐波份额之后, 继续开展对其他元器件标定的修正工作。高次谐波对平响应滤片、XRD 以及 X 光平面镜等的影响是比较大的, 在精密测量中, 必须对其进行高次谐波修正之后才能投入实验使用。

首先对平响应滤片进行修正。在未加平响应滤片时, 标准探测器的电流读数表示为:

$$I_0(\varepsilon) = n'(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot S'(\varepsilon) + n'(2\varepsilon) \cdot 2\varepsilon \cdot S'(2\varepsilon) \quad (9)$$

式中: $S'(\varepsilon)$ 表示该种探测器的灵敏度, 在已知单色光能量 ε 以及光子数比 $R(\varepsilon)$ 后, 基频波的实际电流值 $I'_0(\varepsilon)$ 为:

$$I'_0(\varepsilon) = \frac{I_0(\varepsilon)S'(\varepsilon)}{S'(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)} \quad (10)$$

同理, 求出加上平响应滤片之后基频波的实际电流为:

$$I'_1(\varepsilon) = \frac{I_1(\varepsilon)S'(\varepsilon)\eta'(\varepsilon)}{S'(\varepsilon)\eta'(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)\eta'(2\varepsilon)} \quad (11)$$

式中: $\eta'(\varepsilon)$ 表示真实的滤片透过率。由此得到修正后的标定透过率为:

$$\frac{I'_1(\varepsilon)}{I'_0(\varepsilon)} = \frac{I_1(\varepsilon)}{I_0(\varepsilon)} \frac{\eta'(\varepsilon)[S'(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)]}{S'(\varepsilon)\eta'(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)\eta'(2\varepsilon)} \quad (12)$$

注意到 $I_1(E)/I_0(E) = \eta'(E)$, 所以化简公式 (12) 得:

$$\eta'(\varepsilon) = \frac{I_1(\varepsilon)}{I_0(\varepsilon)} \left[1 + \frac{2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)}{S'(\varepsilon)} \right] - \frac{2R(\varepsilon)S'(2\varepsilon)}{S'(\varepsilon)} \eta'(2\varepsilon) \quad (13)$$

式中: $\eta'(2\varepsilon)$ 是未知量, 但是基于实验真实情况得知, 光源在 800~1 600 eV 范围内的高次谐波份额极低, 可以忽略不计, 故标准探测器在有无平响应滤片情况下的读数的比值即为滤片的实际透过率。利用此能段的数据, 使用公式 (13) 对 800 eV 以下能段的 X 光进行修正。

使用 Matlab 对数据进行插值处理, 得到利用标定的二次谐波份额对平响应滤片透过率的修正的数据如图 4 所示。对比图中修正前后的透过率曲线, 在

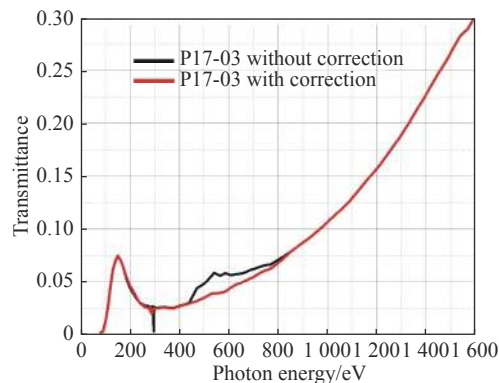


图 4 二次谐波对平响应滤片的影响

Fig.4 Influence of second harmonic on flat response filter

300 eV 附近能区, 实际测量的平响应滤片的透过率存在突变, 而经过二次谐波修正后, 透过率的陡变得到了大幅度的修正, 基本符合理论曲线。而在 450~800 eV 能区内, 修正前的数据和修正后的数据很完美的对应之前二次谐波标定区域, 在一定程度上验证了之前二次谐波标定结果的准确性。这一能段的修正后的数据分布同样更符合理论曲线。

利用同样的原理对 XRD 阴极灵敏度进行修正, 在 800~1 600 eV 能段的 X 光, XRD 阴极灵敏直接表示为:

$$\mathbb{S}(\varepsilon) = \frac{I_{XRD}(\varepsilon)S''(\varepsilon)}{I''_0(\varepsilon)} \quad (14)$$

式中: $I_{XRD}(\varepsilon)$ 表示直接使用 XRD 阴极测量 X 光得到的电流; $I''_0(\varepsilon)$ 表示同一光源同能量标准探测器测量到的电流; $S''(\varepsilon)$ 表示该种标准探测器的能量响应。

在 800 eV 以下能段, 二次谐波影响较大, 引入二次谐波进行计算, 标准探测器和 XRD 探测器测量到的电流分别表示为:

$$\begin{aligned} I''_0(\varepsilon) &= n''(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot S''(\varepsilon) + n''(2\varepsilon) \cdot 2\varepsilon \cdot S''(2\varepsilon) = \\ &= n''(\varepsilon)\varepsilon[S''(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S''(2\varepsilon)] \\ I_{XRD}(\varepsilon) &= n''(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot \mathbb{S}(\varepsilon) + n''(2\varepsilon) \cdot 2\varepsilon \cdot \mathbb{S}(2\varepsilon) = \\ &= n''(\varepsilon)\varepsilon[\mathbb{S}(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)\mathbb{S}(2\varepsilon)] \end{aligned} \quad (15)$$

经过变换得到:

$$\mathbb{S}(\varepsilon) = \frac{I_{XRD}(\varepsilon)}{I''_0(\varepsilon)} [S''(\varepsilon) + 2R(\varepsilon)S''(2\varepsilon)] - 2R(\varepsilon)\mathbb{S}(2\varepsilon) \quad (16)$$

式中: $\mathbb{S}(2\varepsilon)$ 采用 800~1 600 eV 标定的数据, 通过数据迭代, 可以得到 800 eV 以下能段经过修正的数据。

通过 Matlab 插值计算, 利用标定的二次谐波份额对不同阴极 XRD 灵敏度标定结果的修正如图 5 所示。实际每种阴极材料 XRD 都进行多次标定以保证可靠性, 在这里不一一列出。从标定后的结果中看出, 不同阴极材料 XRD 都存在 C、O 污染, 因为有明显的 C、O 的 K 吸收边。修正后改变最明显的是 Au 阴极 XRD, 修正前 Au 阴极 XRD 灵敏度曲线中在理论应存在 O 的 K 吸收边处没有陡增, 反而存在一定凹陷, 经过修正之后, O 的 K 吸收边明显, 凹陷被修复, 整体曲线符合理论预期。对于 Al 阴极 XRD 灵敏

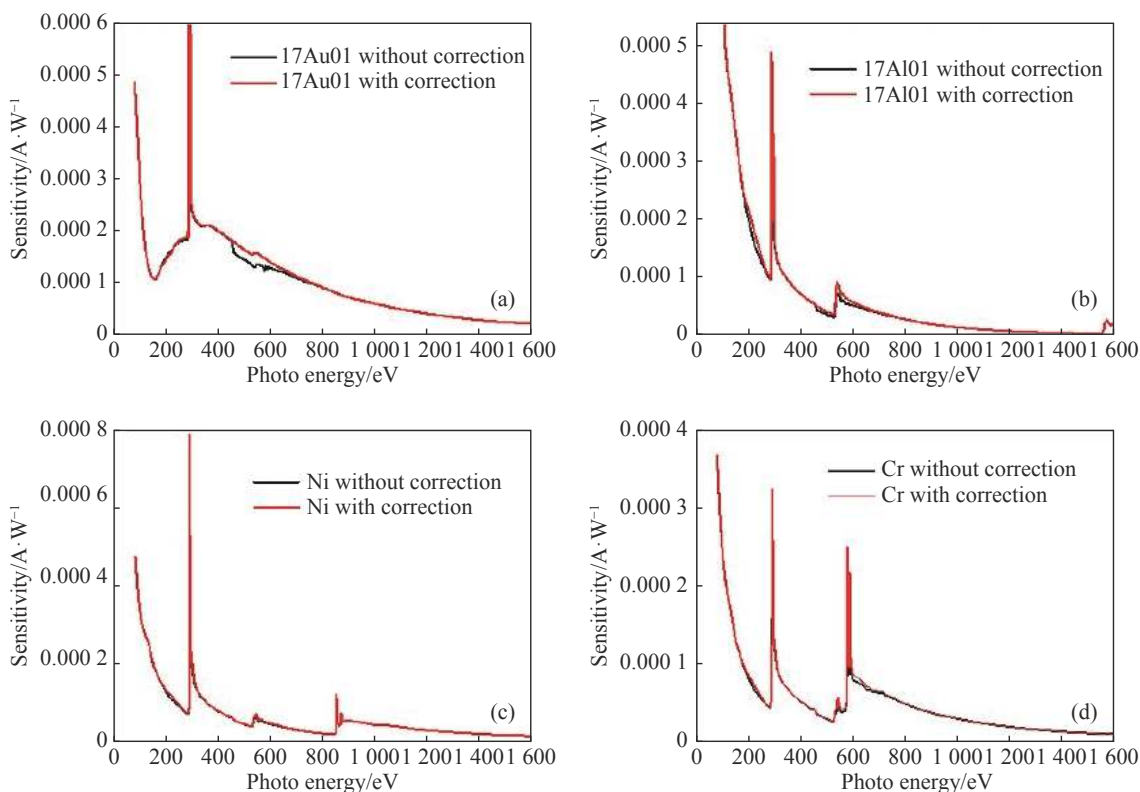


图 5 二次谐波对不同阴极 XRD 的影响 (a) 二次谐波对 Au 阴极 XRD 的影响; (b) 二次谐波对 Al 阴极 XRD 的影响; (c) 二次谐波对 Ni 阴极 XRD 的影响; (d) 二次谐波对 Cr 阴极 XRD 的影响

Fig.5 Influence of second harmonic on XRD with different cathode (a) with Au cathode; (b) with Al cathodes; (c) with Ni cathode; (d) with Cr cathode

度曲线,修正后尾端存在 Al 的 K 边,符合科学理论。其他阴极 XRD 的灵敏度修正同样符合理论预期。

由公式 (1),将平响应滤片的透过率与阴极的灵敏度相乘,得到最后的整体响应曲线。Au 阴极平响应 XRD 整体响应曲线标定前后对比如图 6 所示,与修正前相比,修正后的整体响应的平整性得到了提高,修正后结果和理论预期相符,很好的实现了最终标定的目标。

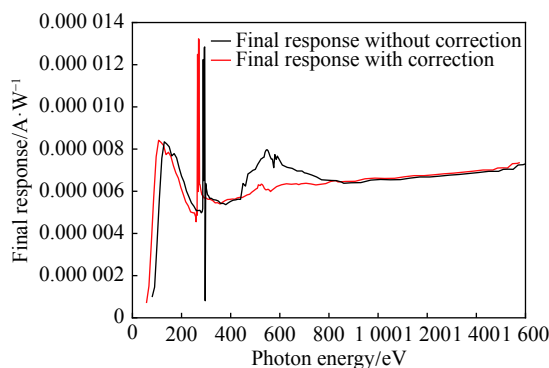


图 6 二次谐波对 XRD 总体响应的影响

Fig.6 Influence of second harmonic on the overall response of XRD

4 结 论

标定是精密诊断的基础,对精度要求很高,而标定使用的束线存在高次谐波的影响。研究提出了一种新的采用滤片对同步辐射光源中二次谐波的份额进行数值评估的方法,并在北京同步辐射光源上开展了滤片标定工作,对光源的二次谐波份额进行实际评估。实际测得同步辐射 4B7B 束线在 180~300 eV 以及 450~800 eV 的范围内,二次谐波比例明显,集中在 10% 左右,在 300 eV 附近,二次谐波的份额最大,达到了 26%,其他范围内份额较小。该技术已经达到了较高的准确性,具有实际可操作性,应用范围广泛。此方法是对透射光栅法标定高次谐波方法的有效补充,并且时间效率更高、数据相对于透射光栅法更准确、采样率更高。同时,对平响应滤片透过率以及 XRD 灵敏度的标定结果进行了二次谐波的修正,修正结果相比于原始标定数据与理论计算结果符合度更高。

致 谢

感谢北京同步辐射装置工作人员的大力支持,感

谢标定团队的全力配合。

参考文献:

- [1] Yamanaka C. Inertial confinement fusion: The quest for ignition and energy gain using indirect drive [J]. *Nuclear Fusion*, 1999, 39(6): 825.
- [2] Lindl J. Development of the indirect drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain [J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 2(11): 3933-4024.
- [3] Heinle R A, Tirseil K G. Filtered mirror sub-keV X-ray measurement system [J]. *Laser Program Annual Report*, 1979, 5: 5-57.
- [4] Bai Yanli, Yao Rongbin, Gao Haiying, et al. Analysis and performance test of the high temporal resolution framing imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0624002. (in Chinese)
白雁力,姚荣彬,高海英,等.高时间分辨分幅成像技术分析 & 性能测试[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0624002.
- [5] Tirseil K G, Kornblum H N, Slivinsky V W. Time resolved, sub-keV X-ray measurements using filtered X-ray diodes[C/OL]. (1979-08-18)[2020-01-20].<https://www.osti.gov/biblio/5481965>
- [6] Li Z, Jiang X, Liu S, et al. A novel flat-response X-ray detector in the photon energy range of 0.1-4 keV [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(7): 073504.
- [7] Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng Zhijian. A sub-keV X-ray spectrometer used in laser plasma interaction experiments [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, 2(1): 16-22. (in Chinese)
孙可煦,杨建国,郑志坚.用于激光等离子体诊断的亚千X射线能谱仪[J]. *强激光与粒子束*, 1990, 2(1): 16-22.
- [8] Yi Rongqing, Zhao Yidong, Wang Qiuping. Characteristic study and application of the soft X-ray beam line 4B7B on BSRF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 345-350. (in Chinese)
易荣清,赵屹东,王秋平.北京同步辐射装置4B7B软X射线标定束线的性能研究及应用[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 345-350.
- [9] Zheng Lei, Zhao Yidong, Cui Mingqi. The primary design of higher-harmonics suppressor for beamline 4B7A and 4B7B at Beijing Synchrotron Radiation Facility [J]. *Nuclear Techniques*, 2007, 30(9): 721-724. (in Chinese)
郑雷,赵屹东,崔明启.北京同步辐射装置4B7A、4B7B光束线高次谐波抑制系统初步设计[J]. *核技术*, 2007, 30(9): 721-724.
- [10] Huang Lei, Wang Tianyi, Mourad Idir. Study on stitching interferometry for synchrotron mirror metrology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303012. (in Chinese)

- 黄磊, 王添翼, Mourad Idir. 对基于拼接干涉术的同步辐射镜测量技术的研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303012.
- [11] Zhu T, Shang W L, Zhang W H, et al. Quantitative measurement of the proportions of high-order harmonics for the 4B7B soft-X-ray source at Beijing Synchrotron Radiation Facility [J]. *Plasma Science and Technology*, 2013, 15(12): 1194-1196.
- [12] Yi Rongqing, Sun Kexu, Wang Hongbin. Absolute calibration of sensitivity of XRD on the synchrotron radiation source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(4): 563-569. (in Chinese)
- 易荣清, 孙可煦, 王洪斌. XRD灵敏度在同步辐射源上的绝对刻度[J]. *强激光与离子束*, 1996, 8(4): 563-569.