

用于平响应 X 光探测器的复合滤片参数优化

车兴森, 侯立飞, 杨轶濛, 杜华冰, 杨国洪, 韦敏习

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在间接驱动的激光惯性约束聚变实验中, 激光辐照产生的 X 射线能流的测量非常重要, 它可以推测出黑腔的辐射温度和激光腔靶的耦合效率, 一般通过平响应 X 射线探测器得到不同角分布的辐射流数据。通过对平响应复合滤片的结构参数进行优化设计, 提高了平响应 X 射线探测器的测量精度。研究了复合滤片中薄金层、厚金层和孔面积比等结构参数对 X 射线探测器响应平整度的影响规律。从实验结果中可以得出: 滤片和金阴极的标定数据和理论结果基本一致, 并且薄金层的厚度对探测器整体响应的平整度起到主要作用, 厚金层厚度和孔面积比影响较小, 优化后探测器的平响应度达到 5%, 与理论设计相一致, 此时的薄金层厚度、厚金层厚度和孔面积比分别为 50 nm、380 nm 和 1:6.1。

关键词: 惯性约束聚变; 平响应滤片; 响应平整度; 辐射流

中图分类号: TN65 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017008

Parameter optimization of compound filters applied for flat-response X-ray detectors

Che Xingsen, Hou Lifei, Yang Yimeng, Du Huabing, Yang Guohong, Wei Minxi

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

Abstract: The absolute measurement of thermal X-ray flux from a hohlraum is essential to get the radiation temperature and the laser-hohlraum coupling efficiency in the experiments of indirect-driven inertial confinement fusion (ICF), which can be measured by a flat response X-ray detector. The configuration parameters of flat-response compound filters were optimized to enhance the performance of flat-response X-ray detectors. The effects of thin layer thickness, thick layer thickness and hole area ratio on response flatness of detectors were investigated. The calculated results agree well with the calibrated data. From the results, it can be found that the thin layer thickness plays a primary role in performance of detectors while thick layer thickness and hole area ration take a minor role. Besides, the detectors show a best response flatness less than 5% which reaches the limit value of theory as the thin layer thickness, thick layer thickness and hole area ratio are 50 nm, 380 nm and 1:6.1.

Key words: inertial confinement fusion; flat-response filter; response flatness; radiation flux

收稿日期: 2017-02-08; 修订日期: 2017-03-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11505168); 国家重点研发计划(2017YFA0403300)

作者简介: 车兴森(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光聚变辐射 X 射线诊断方面的研究。Email: chexingsen@163.com

0 引言

在间接驱动的激光聚变实验中^[1-2], 辐射温度是一个很重要的参数^[3-5], 它表征黑腔辐射场驱动源的强度, 一般可以通过测量 X 射线能流推测出来^[6]。此外, 辐射场对称性的控制也非常关键, 它对内爆的对称压缩起着决定作用, 而辐射流的角分布测量能够获得辐射场对称性的相关信息。因此, 对 X 射线辐射流绝对值的高精度测量就变的格外重要。常见的 X 射线能流测量技术是采用平响应 X 光探测器^[7], 不同于传统平响应 X 光探测器, 新型平响应探测器^[8-9]克服了标定和实际应用的困难, 同时还将平响应区间扩展到 Au-M 带, 实现了 0.1~4 keV 的平响应特性, 有效提高了辐射流测量的精度。探测器包括平响应复合滤片和金阴极两部分, 其工作原理是利用了复合滤片和金阴极对 X 射线截然不同的响应特性: 即金阴极的灵敏度随 X 射线能谱呈降低趋势, 复合滤片透过率随 X 射线能谱呈增加趋势, 两者配合到一起, 整体灵敏度由于互补的关系实现对 X 射线的平响应特性^[10-11]。

目前, 新型平响应 X 射线探测器在 0.1~4 keV 的响应平整度低于 13%, 但是距离理论的 2.9% 仍有较大的差异^[8], 而响应的平整度直接影响了辐射流测量精度。因此, 需要对平响应探测器的结构参数进行优化, 以提高其辐射流测量精度。作为探测器的主要组成元件, 光阴极的结构简单, 响应特性较稳定, 对探测器的整体响应平整度影响较小, 而平响应复合滤片结构参数复杂, 是影响探测器性能的主要因素。

文中通过紫外光刻和电镀工艺^[12]制备了自支撑的平响应复合滤片, 研究了复合滤片的薄金层厚度、厚金层厚度和孔面积比对 X 射线探测器整体响应平整度的影响规律, 优化了复合滤片的结构参数, 实现了探测器最佳的响应平整度。

1 实验方法

图 1 给出了平响应 X 光探测器结构示意图和平响应复合滤片的工艺流程图, 其中平响应复合滤片包括薄金层和厚金层两部分, 并且厚金层上均匀开

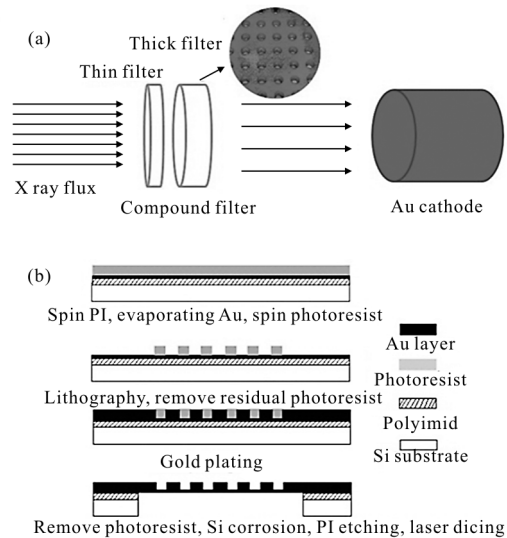


图 1 平响应探测器结构示意图(a)和复合滤片工艺流程图(b)
Fig.1 Schematic diagram of flat response X-ray detector (a) and flow chart of compound filter fabrication (b)

孔。通过调节两层金膜的厚度和孔面积比来实现与光阴极的匹配, 达到对 X 射线平响应的特性, 其制作工艺如下: (1) 首先将硅片在 150℃ 热烘 10 min 以上, 然后旋涂 2 μm 的聚酰亚胺(PI), 并按 90℃1 h/130℃1 h/180℃1 h/270℃4 h 进行亚胺化处理; (2) 采用电子束蒸发技术在 PI 薄膜上沉积薄金层^[13]; (3) 旋涂 AZ5214 光刻胶, 用 URE-2000B 型紫外曝光机进行曝光, 然后用 AZ400K 专用显影液显影, 反应离子刻蚀技术去残胶; (4) 脉冲电镀厚金层; (5) 丙酮溶解光刻胶并清洗; (6) 150℃退火 1 h, 用酸性溶液对硅片进行腐蚀; (7) 利用电感耦合的高密度等离子体(ICP)刻蚀机刻蚀掉 PI 层; (8) 激光划片, 制备出最终的平响应复合滤片。滤片的表面形貌通过扫描电子显微镜进行测量, 薄膜的厚度通过 Detak XT 台阶仪进行测量, 制备出的平响应滤片和光阴极在中国科学院高能物理研究所同步辐射装置(BSRF)上进行标定^[14], 利用其中的 4B7A 和 4B7B 两条束线分别对 70~1 600 eV 和 2 100~5 300 eV 范围的 X 射线进行定量标定, 标定方法与 Campbell 等^[15]标定方法相似。

文中研究了平响应复合滤片的结构参数对 X 射线探测器整体响应特性的影响规律, 并获得了最佳的结构参数。其性能的优异主要通过平响应度 F 来定义:

$$F = \frac{\int_{E_1}^{E_2} (R - \bar{R})^2 dx}{(E_2 - E_1) \bar{R}^2} \quad (1)$$

式中： R 为探测器整体响应函数； \bar{R} 为响应曲线在 E_1 和 E_2 区间的响应平均值，在文中 E_1 和 E_2 分别为 0.1 keV 和 4 keV。 F 的数值越小，整体响应曲线的平整度越好，辐射流测量精度越高。

2 结果与讨论

图 2 给出了金阴极和平响应复合滤片在 0.1~5 keV 的理论数据与标定结果。从图中可以得出，理论数据和标定结果具有高度的一致性。由金阴极的标定实验结果 (图 2(a)) 可知，在 280~320 eV 范围的标定数据偏离理论结果，这主要是由于碳污染和谐波抑制镜的使用导致标定束线源强度急剧减小，标准探测器测量的光电流小于 0.6 pA，而此时弱电流计的暗电流在 0.01~0.04 pA 之间，测量不确定度最大达到 6.7%，致使标定数据与理论结果存在一定的偏差。由图 2(b) 平响应复合滤片的标定结果与理论数据进行对比可以发现，仅在 440~710 eV 范围内存在微小的偏差，偏差范围在 3% 左右，这主要是由于该能段束线未使用谐波抑制镜，存在高次谐波的影响。

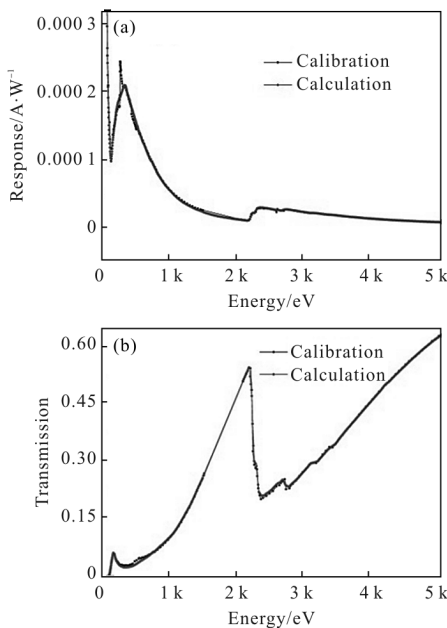


图 2 金阴极(a)和平响应复合滤片(b)的标定结果和理论数据
Fig.2 Calibrated data compared with calculated results of (a) Au cathode and (b) compound filter

响。综上所述，实验使用的理论模型与标定数据具有较高的一致性，可以用来指导实验设计。

在复合滤片结构参数优化过程中，选择金阴极标定数据作为理论设计依据，去除标定数据中的明显坏点和碳污染影响，其响应曲线在图 3 中的插图显示。选择标定的金阴极作为探测器整体响应依据更具有代表性，减少理论设计误差，可更好地指导复合滤片参数设计。众所周知，紫外微电铸工艺制备的平响应复合滤片的孔面积比与理论设计相差可控制在 5% 以内。在前面工作的基础上^[8]，采用理论的复合滤片透过率和光阴极标定数据，适当改变孔面积比，得到探测器理论整体响应曲线与孔面积比的关系 (如图 3 所示)，此时薄金层和厚金层的厚度分别为 50 nm 和 400 nm。从理论设计结果中可以发现，孔面积比对探测器的整体响应平整度影响较小，孔面积比的改变主要影响 0.1~1.5 keV 能区的响应特性，当孔面积比变化了 20% (1/5.4~1/6.6) 时，探测器的平响应度 F 在 5%~7.3% 变化。探测器的理论响应平整度极限值出现在孔面积比为 1:6.1 时，此时探测器的平响应度为 5%，达到最小值。

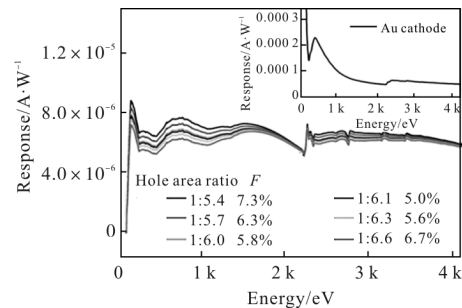


图 3 不同孔面积比下探测器的理论响应曲线
Fig.3 Theoretical response curves of detectors with different hole area ratio

利用光阴极的标定数据确定了探测器平响应度的理论值，通过工艺实验进一步对结构参数进行优化并与理论数据进行对比研究。首先，复合滤片薄金层的透过率对厚度比较敏感，尤其在 0.1~0.8 keV 范围内，薄金层的厚度对探测器的响应平整度起主要作用。实验中制备了不同薄金层厚度的复合滤片用于研究，复合滤片的主要结构参数如表 1 所示。图 4 给出了不同薄金层厚度下探测器在 0.1~4 keV 的整体响应曲线和响应曲线的平响应度 F ，从图中可以得出复合滤片的薄金层厚度主要影响 0.1~1.5 keV

范围内的响应特性,厚金层厚度主要影响 2.1~4 keV 范围内的响应特性。随着复合滤片薄金层厚度的增加,探测器的整体响应平整度先减小后增大,最小值出现在薄金层厚度为 50 nm 左右处,此时的探测器平响应度为 5.8%。

表 1 不同薄金层厚度复合滤片的结构参数

Tab.1 Structural parameters of compound filters with different thin layer thickness

| No. | Thin layer thickness/nm | Hole area ratio | Thick layer thickness/nm |
|-----|-------------------------|-----------------|--------------------------|
| 1# | 65 | 1:6 | 420±10 |
| 2# | 60 | 1:5.9 | 410±10 |
| 3# | 55 | 1:6 | 410±10 |
| 4# | 50 | 1:6.1 | 410±10 |
| 5# | 45 | 1:6 | 430±10 |
| 6# | 40 | 1:6.1 | 420±10 |

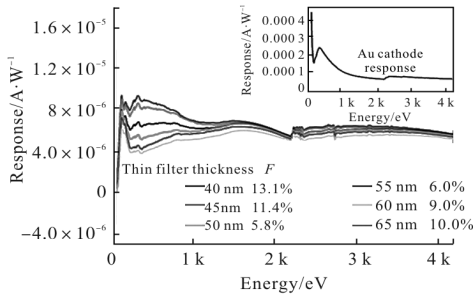


图 4 不同薄金层厚度的探测器的整体响应曲线

Fig.4 Final response curves of detectors with different thin layer thickness

为了进一步改善探测器的响应平整度,对复合滤片厚金层的厚度进行了优化设计,图 5 给出了不同厚金层探测器的整体响应曲线和响应曲线的平响应度 F ,其中样品的孔面积比和薄金层厚度分别为 1:6.1 和 50 nm。实验结果表明:随着厚金层厚度的减小,探测器的平响应度减小,当复合滤片厚金层厚度减至 380 nm 时,响应的平响应度为 5%,与理论设计值相一致。最终得到的复合滤片优化结构参数为 50 nm/380 nm/1:6.1,与理论设计参数接近,导致厚金层厚度与理论设计参数偏差的主要原因是电子束蒸发的薄金层致密性相对较差,导致薄金层实际有效厚度小于测量值,通过与金膜理论透过率数据进行对比,确认有效厚度在 45 nm

左右,相应的低能区域(0.1~1.5 keV)响应曲线抬高,为了与之相匹配实现整体响应曲线平整,高能区域(2~14 keV)也应抬高,因此厚金层厚度从设计的 400 nm 减小到 380 nm。

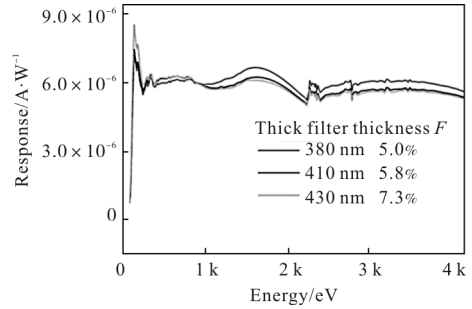


图 5 不同厚金层厚度的探测器整体响应曲线

Fig.5 Final response curves of detectors with different thick layer thickness

3 结论

通过对平响应 X 光探测器的主要组成元件-复合滤片的结构参数进行优化设计,采用标定金阴极数据作为理论设计依据,实现了对复合滤片结构参数的精确设计,提高了平响应 X 射线探测器的测量精度。研究表明:复合滤片中薄金层厚度对 X 射线探测器响应的平整度的影响起主要作用,且主要影响 0.1~1.5 keV 能区的响应特性,而厚金层厚度和孔面积比对探测器的平响应度影响较小。优化后的探测器最小平响应度为 5%,与该实验设计的理论极限值相一致,此时复合滤片的结构参数与理论设计基本相符,其中薄金层厚度、厚金层厚度和孔面积比分别为 50 nm、380 nm 和 1:6.1。

参考文献:

[1] Gao Chongxin, Yi Tao, Wang Chuanke, et al. Pulse antenna in application of high power laser target electromagnetic pulse diagnosis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606007. (in Chinese)
高崇信, 易涛, 王传珂, 等. 用于强激光靶耦合诊断的脉冲天线[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0606007.

[2] Yang Yisheng, Han Wei, Tan Jichun, et al. Spectial group-velocity mode in process of third-harmonic generation of ultrashort pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 468-472. (in Chinese)
杨义胜, 韩伟, 谭吉春, 等. 超短脉冲三倍频中特殊群速度

- 组合的分析[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 468-472.
- [3] Betti R, Chang P Y, Spears B K. Thermonuclear ignition in inertial confinement fusion and comparison with magnetic confinement[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17: 058102-058110.
- [4] Xiao Delong, Sun Shunkai, Zhao Yingkui. Numerical investigation on target implosions driven by radiation ablation and shock compression in dynamic hohlraums [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(5): 052709.
- [5] Kline J L, Yi S A, Simakov A N. First beryllium capsule implosions on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(5): 056310.
- [6] Glenzer S H, MacGowan B J, Michel P. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies [J]. *Science*, 2010, 327: 1228-1231.
- [7] Hou Lifei, Du Huabing, Li Jin, et al. Performance of X-ray diode with a smaller cathode area [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (12): 4040-4044. (in Chinese)
侯立飞, 杜华冰, 李晋, 等. 小灵敏面 X 光二极管性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4040-4044.
- [8] Li Zhichao, Jiang Xiaohua, Liu Shenye. A novel flat-response X-ray detector in the photon energy range of 0.1-4 keV[J]. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 073501-073504.
- [9] Li Zhichao, Zhu Xiaoli, Jiang Xiaohua. Note: continuing improvements on the novel flat-response X-ray detector[J]. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 106101-106104.
- [10] Kornblum H N, Slivinsky V W. Flat-response, subkiloelectronvolt X-ray detector with a subnanosecond time response [J]. *Rev Sci Instrum*, 1978, 49: 1204-1205.
- [11] Zheng Zhijian, Ding Yongkun, Ding Yaonan. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15 (11): 1073-1078. (in Chinese)
郑志坚, 丁永坤, 丁耀南. 激光-惯性约束聚变综合诊断系统[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1073-1078.
- [12] Chen Yun, Li Yanru, Zhang Hongsheng. Improvement on fabrication technology of metallic mesh based on ZnS [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 131-136. (in Chinese)
陈贇, 李艳茹, 张红胜. 基于 ZnS 金属网栅制作工艺的改进[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 131-136.
- [13] Zou Penghui, Chen Shutian, Gao Jianfeng. Analysis on the Au films at different rates by electron beam evaporation deposition [J]. *Research and Progress of SSE*, 2013, 33(5): 462-465. (in Chinese)
邹鹏辉, 陈舒恬, 高建峰. 电子束蒸发金膜速率分析[J]. 固体电子学研究与进展, 2013, 33(5): 462-465.
- [14] Liu Dingxiao, Sheng Weifan, Wang Qiushi. Current status and trends of stitching interferometry in synchrotron radiation field [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 34(10): 2357-2369. (in Chinese)
刘丁泉, 盛伟繁, 王秋实. 拼接干涉技术在同步辐射领域的发展现状及趋势 [J]. 光学精密工程, 2016, 34(10): 2357-2369.
- [15] Campbell K M, Weber F A, Dewald E L. Omega Dante soft X-ray power diagnostic component calibration at the National Synchrotron Light Source [J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, 75: 3768-3771.