

小灵敏面 X 光二极管性能研究

侯立飞¹, 杜华冰¹, 李 晋¹, 任 宽¹, 杨轶濛¹, 崔延莉¹, 窦延娟², 杨国洪¹, 刘慎业¹

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: X 光二极管(XRD)小型化有助于优化软 X 光能谱仪,也可实现与其他 X 光诊断设备的集成应用。完成了小灵敏面 X 光二极管机构设计,储能电容更合理,体积更小。开展了微波仿真与模拟计算,在 0~20 GHz 的带宽范围内其反射很小,微波传输特性满足实验要求。另外,在短脉冲激光装置上开展了探测器性能研究实验。结果表明探测器时间分辨能力提升 20%左右。小灵敏面 X 光二极管研究有助于探测器在辐射流监测的方面获得更广泛的应用。

关键词: X 光二极管; 储能电容; 灵敏面; 时间分辨

中图分类号: TH842 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4040-05

Performance of X-ray diode with a smaller cathode area

Hou Lifei¹, Du Huabing¹, Li Jin¹, Ren Kuan¹, Yang Yimeng¹, Cui Yanli¹, Dou Yanjuan²,
Yang Guohong¹ Liu Shenye¹

(1. Laser Fusion Research Center, China Academy Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: It will be helpful for soft X-ray Spectrometer that X-Ray diode (XRD) can be improved to be more compact. And it will be convenient that other X-ray diagnosis apparatus integrate the mini-XRD. A new XRD with smaller cathode was designed, which owned more reasonable capacitor for power storage and smaller size. Microwave performances of the output part were simulated. The results show that signal distortion and reflection is ignorable in the range of 0-20 GHz and experiments requirements can be satisfied. And detector character test experiments were carried on the short pulse laser equipment. Data indicates that capability of temporal resolution was improved by 20%. Because of the study of detector with smaller cathode area, XRD will be more popular for estimating of X-ray flux.

Key words: X-ray diodes; capacitor for power storage; cathode area; temporal resolution

收稿日期:2014-04-05; 修订日期:2014-05-15

基金项目:国家高技术研究发展计划

作者简介:侯立飞(1981-),男,硕士生,主要研究方向为 X 射线能谱诊断。Email:gulaof@aliyun.com

通讯作者:窦延娟(1985-),女,助理研究员,主要研究方向为激光数据处理。Email:douyj-122@163.com

0 引言

惯性约束聚变(ICF)研究中,利用激光等离子体产生的高强度 X 光辐射源,可开展黑腔物理、辐射运输、辐射烧蚀、辐射不透明度等一系列研究^[1-3]。这些研究均需要对 X 光谱进行能量分辨、时间分辨的定量测量。X 光二极管是 X 光能谱测量、谱强度测量和时间分辨测量的重要探测器,尤其是由 XRD 阵列构成的软 X 光能谱仪,在 X 光时间分辨谱的定量测量中具有不可替代的作用^[4-6]。另外,黑腔物理、辐射运输等实验的 X 光能流角分布测量及金 M 带的测量由平响应 X 光二极管进行探测,其核心器件也是 XRD。由于应用的重要性与广泛性,XRD 探测器的优化改进与性能研究需要持续进行^[7-13]。小型化 XRD 可有效解决软 X 光能谱仪体积大与质量重的突出问题。另外,基于微型化的探测器可开发小型化平响应探测装置,将其集成于 X 光条纹相机等设备。这样可监测 X 光条纹相机等设备所在位置的 X 光辐射流情况,避免了空间分布的不良影响,可获得更加准确的测量结果,为宿主设备诊断分析提供的重要依据。

文中首先设计了小灵敏面的 X 光二极管结构,探测器储能电容更合理,结构更紧凑。对 XRD 输出部件进行了微波仿真与模拟,得到其在 0~20 GHz 的带宽范围内反射情况,检验是否满足实验高频信号输出与高时间分辨的要求。在 8 ps 激光装置上开展了探测器性能测试实验,得到其上升时间与半高宽,检验了探测器的时间分辨能力。

1 X 光二极管原理

针对软 X 光测量特点,为获得快响应测量效果,探测器采用无窗、平板结构的光电转换型软 X 光二极管。探测器工作时,脉冲光子群穿过网状阳极,打在阴极上,产生光电子群,光电子在阴阳极间强电场加速下,迅速向阳极运动,从而在输出电路中感应出脉冲电流输出电脉冲。

XRD 主要由四大部件构成:储能部件、输出部件、供电部件和外壳组成。

储能部件是 XRD 的核心部件,由一个特制的电

容连接网状阳极构成,以电荷形式储存能量。储能电容可以补充 XRD 工作瞬间感应电流造成的能量损耗。工作时,偏压保证阴阳极间获得所需电场,并对储能电容进行充电。当 X 光信号达到阴极时,储能电容放电,为电子产生与运动提供足够能量,保证电信号输出的线性。

输出部件是由一组同轴的光阴极,真空连接件和信号输出头构成,该系统须与传输电缆和记录设备保持阻抗匹配。

2 X 光二极管结构

新型 XRD 探测器结构如图 1 所示,其中 1 为输出组件,2 为偏压组件,3 为阳极网,4 为储能组件,5 为探测器外壳。其阴阳极有效直径均为 $\varphi 5 \text{ mm}$,输出结构为 SMA 接头。由于 SMA 接头体积小,偏压 SHV 接头与 SMA 接头设置在同一个法兰上。SMA 接头位于法兰中心,高压头设置在其侧旁。原有 XRD 外形尺寸为 $\varphi 77 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,质量 1 500 g。而新型 XRD 外形尺寸为 $\varphi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,质量不足 350 g。更紧凑,更轻巧 XR 探测器的研制,可有效解决制约软 X 光能谱仪体积与质量的主要问题。

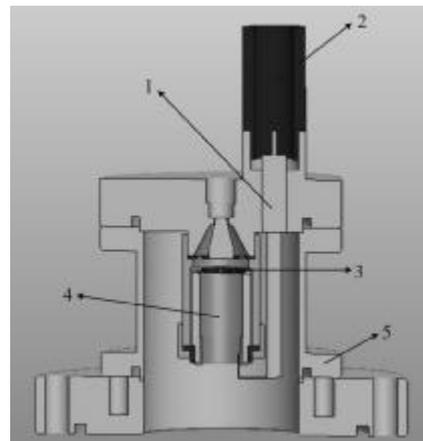


图 1 小灵敏面 XRD 结构

Fig.1 Structure of XRD with small cathode area

2.1 储能系统

XRD 储能电容由一个平行板电容器和一个同轴筒状电容器组成(可近似为两平行板电容器相加,则储能电容:

$$C = \frac{\varepsilon(R^2 - r^2)}{4d} + \frac{\varepsilon R l}{\Delta d} \quad (1)$$

式中: ε 为电容介质的相对介电常数; R 为筒端圆环状平板电容器的圆环外半径; r 为筒端圆环内半径; d 为平行板间隔; l 为同轴筒长度; $\Delta D = D_2 - D_1$, D_1 为内筒外径; D_2 为外筒内径。

根据设计要求, XRD 线性电流要达到 4 A, 则允许输出信号最大值为 200 V。已知物理实验脉宽不大于 3 ns, 则最大输出电荷量为 1.2×10^{-8} C。XRD 储能电容为 50 pF, 偏压为 5 000 V 时其储存电荷量为实际需求的 20 倍。而目前在探测器前设置中性衰减片, 可以有效减少 X 光通量, 其储能电荷量要求可设定为实际需求值。储存电荷量为实验需求值即可满足要求。即偏压为 5000 V 时, XRD 储能电容为 2.5 pF 即可。目前制作的 XRD 样品实际储能电容为 2.3 pF。

2.2 输出系统

原有 XRD 输出部件主要包括阴极、阴极固定板、锥形过渡腔、锥形连接件、输出头等, 要满足同轴要求, 又须与传输电缆及记录设备的阻抗保持匹配。新型 XRD 阴极尺寸缩小一倍, 将其底座制作成锥形, 直接与输出头连接, 而锥形过渡腔与法兰合并为一个零件, 将 N 型输出头升级为 SMA 输出头。

利用 CST 微波工作室软件对输出部件进行仿真分析。输出部件重点部分为锥形过渡腔与锥形连接件, 完成了其结构建模。阴极面设置为端口 1, 输出端设置为端口 2。模拟计算结果如图 2 所示, 其中端口 1 输入信号, 端口 1 的反射信号, 端口 2 输出的信号分别如图 2(a)、(b)、(c) 所示, 得到端口 1 的反射系数 S_{11} 如图 2(d) 所示。结果表明在 0~20 GHz 的带宽范围内其 S_{11} 参量小于 -20 dB, 反射很小, 满足实验高频信号输出要求。

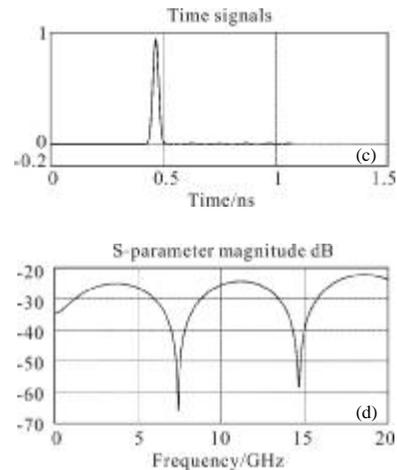
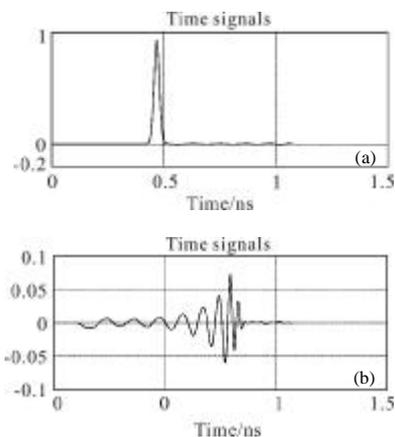


图 2 输出部件仿真结果

Fig.2 Simulation results of output part

3 X 光二极管性能测试

XRD 性能研究实验是在短脉冲激光装置上进行的, 实验布局参见图 3。激光装置脉冲宽度约 8 ps, 激光能量 mJ 级, 波长 266 nm。使用的记录示波器为 8 GHz 带宽, 信号传输电缆为 1 m 长的 SUJ-50-3-5。

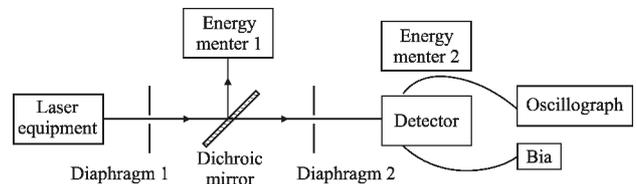


图 3 XRD 性能研究实验排布图

Fig.3 Arrangement of XRD performance experiments

3.1 耐高压特性

在性能测试实验前, 对 XRD 耐高压能力进行了测试。测试结果表明其耐压能力可达 6 000 V。施加偏压后, XRD 稳定状态至少可持续 20 min 以上。在之前的耐压实验中, 对供电部件各零件的耐压能力也进行了研究。高压电缆(SYV-75-5)、高压连接器(SHV)在大气中的耐压能力均大于 8 000 V, 高压真空转接头耐压为 7 000 V 左右。在 2×10^{-3} Pa 真空条件下, 目前 XRD 的耐压能力主要受限于阴阳极间距^[9]。

3.2 冲击响应特性

图 4 为 XRD 在 8 ps 短脉冲激光装置上的典型测试结果, 其中圆形数据与方形数据分别为新型 XRD 在偏压 4 000 V 与 6 000 V 条件下的输出信号,

而三角形数据是原有 XRD 在偏压 4 000 V 条件下的输出信号。XRD 的信号波形在下降沿末端有较小的下冲现象,取其积分绝对值作为信号拖尾部分计算,得到新型 XRD 信号拖尾部分所占比例为 8.9%,而原有探测器的该比例为 6.6%,系统冲击响应特性相当,但仍具有优化空间。

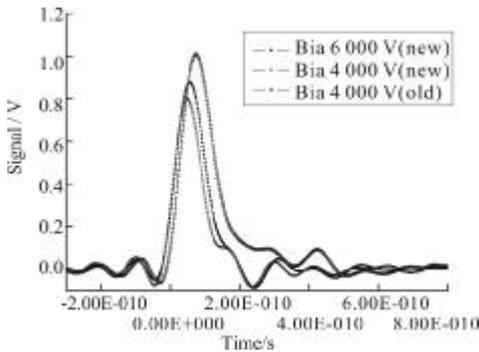


图 4 XRD 输出脉冲波形

Fig.4 Output waveform of XRD

3.3 时间特性

根据 XRD 工作原理,X 光在阴极上产生的光电子在电场作用下,向阳极运动的运行时间为渡越时间:

$$\tau = \sqrt{\frac{2m_e}{eV_{Bia}} h} \quad (2)$$

式中: h 为阴阳极间距; V_{Bia} 为 XRD 偏压。

上升时间定义为:从脉冲上升沿幅度为 10% 峰值时刻起,到 90% 峰值时刻止为脉冲上升时间。XRD 输出信号上升沿响应时间为:

$$t_r = 0.8\tau = 0.8\sqrt{\frac{2m_e}{eV_{Bia}} h} \quad (3)$$

XRD 输出脉冲上升沿取决于渡越时间,下降沿取决于放电回路的放电常数。图 5 为 XRD 等效工作电路。

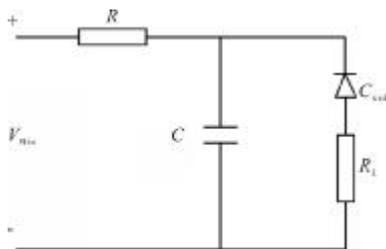


图 5 XRD 等效工作电路图

Fig.5 Operating circuit of XRD

在放电回路中,放电常数 $T = R_L C_{xrd}$,其中 R_L 为负载电阻, C_{xrd} 为 XRD 极间电容。XRD 极间电容为:

$$C_{xrd} = \frac{\epsilon A}{4\pi h} \quad (4)$$

式中: A 为阴极表面积; h 为 XRD 阴阳极间距;空气介质的介电常数 $\epsilon = 1$,则 XRD 放电常数 $T = R_L \epsilon A / 4\pi h$ 。与上升时间定义类似,后沿下降时间 $t_f \approx 2.2T$,整个放电时间 $\tau_f = \frac{t_f}{0.8} = 2.75T$,则半高宽:

$$T_w = 0.5(\tau_r + \tau_f) = \sqrt{\frac{m_e}{2eV_{Bia}} h} + 0.34 \frac{R_L \epsilon A}{\pi h} \quad (5)$$

由公式(3)和公式(5)可知,当 XRD 阴阳极间距确定后,XRD 上升时间和半高宽均为以偏压 V_{Bia} 为变量的双曲函数。实验结果表明,偏压为 4 000 V 时,原有 XRD 上升时间 t_r 约为 70 ps,半高宽 T_w 约为 120 ps;新型 XRD 上升时间 t_r 约为 55 ps,半高宽 T_w 约为 95 ps。时间分辨能力在原有基础上提升约 20%。

4 结 论

文中完成了通过优化设计小灵敏面 XRD,获得外形尺寸为 $\varphi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的新型探测器,质量小于 350 g。其储能电容更合理,体积更小。微波仿真与模拟结果表明,在 0~20 GHz 的带宽范围内其 S_{11} 参量小于 -20 dB,反射很小,满足实验高频信号输出与高时间分辨的要求。探测器性能测试结果给出,探测器时间分辨能力提升 20%左右。小灵敏面 XRD 保证了探测器输出阻抗要求,并提升了时间分辨能力,有助于 XRD 辐射流监测的更广泛的应用。在进一步研究中,瞄准 XRD 微型化方向,以实现集成化应用,保证使用方便广泛。

参考文献:

- [1] Zhang Jun, Pei Wenbin, Sui Chengzhi, et al. Radiation temperature and X-ray conversion efficiency for laser-cavity target [J]. Acta Physica Sinica, 1991, 40(3): 424-432. (in Chinese)
张钧,裴文兵,隋成之,等.激光柱型腔靶 X 光温度和 X 光转换效率[J].物理学报,1991,40(3): 424-432.
- [2] Lindl J. Development of the indirect-drive approach of ICF and the target physics basis for ignition and gain [J]. Phys Plasmas, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [3] Lindl J, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition

- facility[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [4] Yang Jiamin, Ding Yaonan, Zheng Zhijian, et al. Quantitative measurement of soft-X-ray spectrum using transmission grating spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(9): 1723-1728. (in Chinese)
杨家敏, 丁耀南, 郑志坚, 等. 软 X 光能谱定量测量技术研究[J]. *物理学报*, 2001, 50(9): 1723-1728.
- [5] Sorce C, Schein J, Weber F, et al. Soft X-ray power diagnostic improvements at the Omega laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E518-1-10E518-4.
- [6] Idzorek G C, Tierney T E, Lockard T E, et al. Reproducible, rugged, and inexpensive photocathode X-ray diode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10E922-1-10E922-3.
- [7] Hou Lifei, Yi Rongqing, Liu Shenye, et al. Laser and plasma pulse source for calibration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 2007, 19(1): 79-82. (in Chinese)
侯立飞, 易荣清, 刘慎业, 等. 激光等离子体脉冲标定源[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(1): 79-82.
- [8] Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng Zhijian. A subkeV 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 光能谱仪[J]. *强激光与粒子束*, 1990, 2(1): 16-22.
- [9] Hou Lifei, Yang Guohong, Liu Shenye, et al. Development of X-ray diode with high performances [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 652-656. (in Chinese)
侯立飞, 杨国洪, 刘慎业, 等. 高性能 X 光二极管的研制. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 652-656.
- [10] Sun Kexu, Jiang Shao'en, Yi Rongqing, et al. Research on time characteristics of soft X-ray diode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(1): 68-75. (in Chinese)
孙可煦, 江少恩, 易荣清, 等. X 光二极管时间特性研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(1): 68-75.
- [11] Jiang Shao'en, Sun Kexu, Peng Nengling, et al. Development on mini X-ray diode [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2004, 24(6): 571-574. (in Chinese)
江少恩, 孙可煦, 彭能岭, 等. 小型 X 光二极管的研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2004, 24(6): 571-574.
- [12] Chen Liang, Zhang Yan, Chen Jun, et al. Fabrication and characterization of back-illuminated GaN/AlGaIn p-i-n UV detector with high performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 928-933. (in Chinese)
陈亮, 张燕, 陈俊, 等. 高性能背照式 GaN/AlGaIn p-i-n 紫外探测器的制备与性能 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 928-931
- [13] Bai Yun, Shao Xiumei, Chen Liang, et al. Effect of electron irradiation on the GaN-based p-i-n UV detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2008, 37(2): 270-273. (in Chinese)
白云, 邵秀梅, 陈亮, 等. GaN 基紫外探测器的电子辐照效应[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 270-273.