

小型化快响应软X射线探测器研究

王占平¹, 唐小宏¹, 易荣清², 高椿明¹, 周 鹰¹, 杨立峰¹, 王亚非¹

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

【摘要】研制了用于探测脉宽为亚纳秒级软X射线脉冲的小型化X射线探测器, 对该类结构的X射线探测器的响应时间参数进行了理论分析与计算。根据理论分析与计算结果, 采用基于有限元法的电磁场仿真软件HFSS10.0对该探测器的探测二极管进行了电磁场建模与仿真, 并根据传输线理论对传输超宽带信号的同轴输出通路进行了优化设计, 采用超薄高介电强度薄膜构成大存储电容的新方式, 解决了设计该类高速探测器中存在的大存储电容与耐高压的技术难题。在“神光Ⅲ原型激光装置”上对该探测器进行了实验考核。实验结果表明, 探测器的响应时间可达51 ps。此外, 还对设计该类高速响应探测器时某些物理学方面的考虑进行了讨论。

关键词 有限元法; HFSS; 响应时间; 软X射线探测器; 超宽带

中图分类号 TL812

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.022

Development on Miniature Fast Response Detector for Soft X-Ray

WANG Zhan-ping¹, TANG Xiao-hong¹, YI Rong-qing², GAO Chun-ming¹,
ZHOU Ying¹, YANG Li-feng¹, and WANG Ya-fei¹

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

Abstract This paper introduces the miniature soft X-ray detector for detecting the subnanosecond X-ray pulse. Its response time is analyzed and calculated in theory. According to the results of the theoretical analysis, the HFSS based on the finite element theory is used to model and simulate the X-ray diode and the transmission line theory is applied to design the ultra-broad band coaxial line also. The high dielectric strength film is chosen to fabricate the big storage capacitance and therefore to solve the problem that it is difficult to fabricate big storage capacitance and high voltage resistance at the same time. The characteristic of the detector is experimentally examined on the archetype of “Shengguang III Laser Facility” and the response time is about 51ps. also, Some different physics aspects that need to be considered when designing such fast response detectors are discussed.

Key words finite element theory; HFSS; response time; soft X-ray detector; ultra-broad band

在惯性约束聚变(ICF)研究中, 由高能强激光激发的等离子体所发射的高强度X射线能谱主要集中在软X射线能区^[1-3], 因此通过测量软X射线能区的X射线谱特性, 可诊断激光产生的等离子体的状态信息, 进而得到有关激光与等离子体相互作用的物理信息和化学信息^[4-6]。

“神光Ⅲ原型激光装置”可获得高强度的超窄X射线脉冲辐射, 脉宽达皮秒级^[7]。初步的研究表明, X射线的各向异性及能谱的非平衡特性非常明显^[8]。为了研究激光的吸收与转换、光辐量再分配等过程的物理机制, 以及光辐射谱的谱特性和方向性等问题, 需要利用多台小型化软X光能谱仪对高强度的X射线脉冲源进行多角度的精细测量与研究^[9]。从有限的靶室诊断空间来说, 意味着必须研制小型化的

软X射线能谱仪, 其关键环节即是研制小型化的快响应X射线探测器^[10-12]。

1 工作原理

入射的X射线穿过探测器二极管的阳极网辐照探测器的阴极产生光电子, 光电子在电场的作用下脱出阴极, 在极间电场加速下飞向阳极, 在探测器的阴阳极之间形成脉冲电流。根据麦克斯韦电磁理论, 该脉冲电流将产生瞬变的交变电磁场并沿空气同轴线向外传播。若该同轴线外接匹配的负载, 则在该匹配负载上形成脉冲电信号。匹配可由示波器的输入阻抗承担, 即可由示波器测出脉冲信号的电压和电流大小, 给出入射X射线的时域变化情况, 获得激光等离子体的相关诊断信息。

收稿日期: 2009-01-04; 修回日期: 2009-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(50506006)

作者简介: 王占平(1965-), 男, 副教授, 主要从事光电探测技术、微波毫米波电路与系统方面的研究。

探测器最重要的参数是响应时间, 其大小等于示波器测出的脉冲信号的上升时间和下降时间之和。影响探测器响应时间的主要因素是探测器的直流偏压、探测二极管阴阳极极间距离、同轴传输线的传输带宽以及信号输出通路的匹配连接情况; 其中, 直流偏压和极间距离的大小影响信号的上升时间, 传输带宽大小和匹配连接好坏影响信号的下降时间。

2 响应时间及其理论设计

对X射线辐照到阴极时产生的瞬态电磁场而言, 根据麦克斯韦方程和电磁场边界条件进行严格的理论计算得出脉冲信号的解析式是很困难的。但从工程设计角度来讲, 可从两个方面分析影响该脉冲信号半高宽(FWHM)的因素, 找到降低脉冲信号的上升时间和下降时间的方法, 提高探测器的时间响应指标。

2.1 上升时间设计

设激光源为飞秒级, 可将其作用物质后产生的软X射线视为 $\delta(t)$ 脉冲光, 该脉冲光照射阴极时, 阴极几乎没有时间延迟地发射光电子。在此期间, 极间电场在时间和空间上存在一定的非均匀性, 电子的速度将随时间非均匀地增加, 因此在电子飞向阳极的过程中, 将一直在外电路中产生感应电流, 直到电子到达阳极为止。可见, 为了降低脉冲信号的上升时间, 应使二次电子尽快到达阳极。

由于入射光子存在一定的能量分布, 因此光电子的能量也存在一定的能量分布, 能量最低的光电子从阴极到达阳极的时间为光电子的渡越时间, 可用 t_d 表示。

设输出瞬态信号的上升时间为 t_r , 则有 $t_r=0.8t_d$ (从 t_d 的10%~90%), 为进行估算, 假设极间电场强度均匀, 则根据牛顿第二定律, 有:

$$qE = ma \tag{1}$$

$$t_d = \sqrt{2L/a} = \sqrt{2mL/qE} = L\sqrt{2m/qV} \tag{2}$$

式中 m 为电子的质量; q 为电子的电荷量; V 为静电场的电压; L 为阴阳极之间的距离; a 为电子的加速度。

根据计算结果, 偏压越高, 电子的渡越时间越短, 由光子能量分布引起的时间分辨变差得到抑制, 探测器时间分辨能力得到提高。根据式(2)和探测器的结构, 可以给出光电子的渡越时间与极间直流偏压关系的理论曲线, 如图1所示。

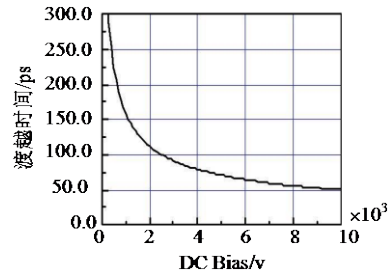


图1 探测器的渡越时间与直流偏置电压关系理论曲线

实际测试中, 得到X射线探测器的直流偏压与输出脉冲信号的上升时间关系与理论预期符合较好, 如图2所示。

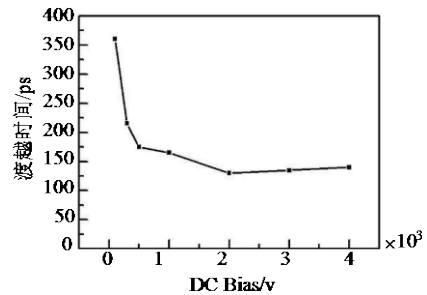


图2 探测器偏压与输出脉冲信号上升时间的关系

为了使探测器的直流偏压尽可能高, 要求探测二极管的极间静电场尽量均匀, 以防止因局部静电场场强过大而发生高压击穿现象。因此, 要求X光探测二极管的阳极尽量平整光滑, 并对阴极进行耐高压处理。为此, 采用Ansoft公司出品的电磁场分析软件HFSS对X射线探测二极管进行仿真与优化设计, 仿真结果如图3所示。

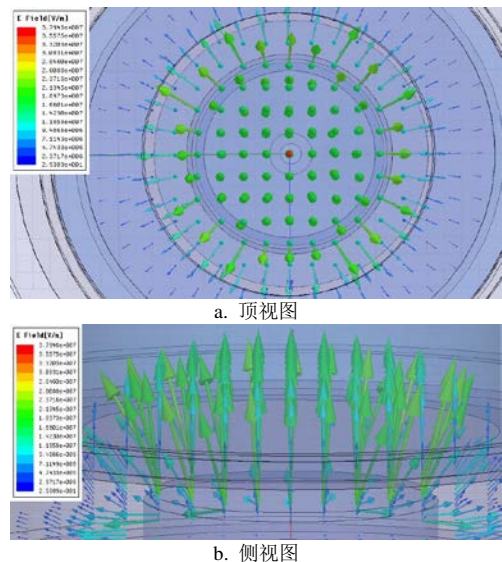


图3 小型化X射线探测二极管极间电场仿真结果

由图3可见, 极间电场基本均匀, 阴极边沿区域的场强略大, 强、弱场强值相差约10%左右。

2.2 下降时间设计

超窄X射线脉冲产生的电磁场脉冲信号具有较

宽的频谱。假设其为半高脉宽为50 ps的标准高斯型脉冲信号,则由傅里叶变换可求得有效带宽将近15 GHz,且直流和低频分量丰富,其归一化幅频特性如图4所示。

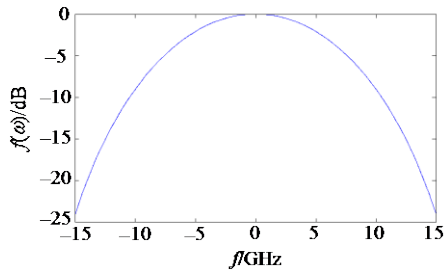


图4 标准高斯型脉冲信号频谱分布(FWHM=50 ps)

为了尽可能减少传输该信号的时域波形失真,获得较小的半高宽,提高探测器的时间分辨能力,必须在承受直流偏置高压(如3 000 V)的情况下尽可能获得较小的放电时间,亦即获得较大的存储电容。为此,设计中采用了精密加工配合多层高介电强度薄膜构成大存储电容的新方式,耐高压性能稳定,工艺简单可靠,可成功解决了大存储电容与耐高压的矛盾。

根据探测器的结构特点和使用环境,本文设计了超宽带同轴传输线输出超短脉冲信号。仍采用Ansoft公司出品的电磁场分析软件HFSS对超宽带同轴输出线进行优化设计,其仿真结果如图5所示。

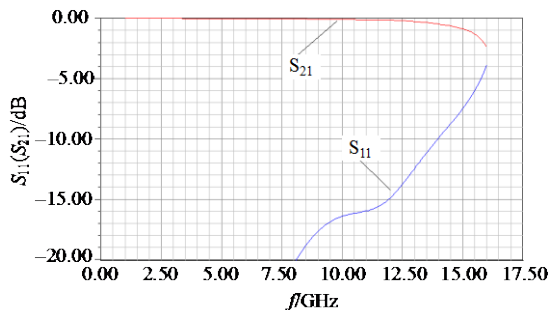


图5 超宽带同轴输出线特性仿真结果

图中 S_{11} 和 S_{21} 分别表示超宽带同轴传输线的反射特性和传输特性。

由图可见,在直流至15 GHz的带宽内,信道具有良好的传输特性。显然,若需测试更窄的脉冲信号,则应该对探测器的结构和同轴传输线结构进行更加专门的设计,以消除诸如同轴线高次模等可能影响脉冲传输的不良因素。

3 响应时间测试

3.1 测试依据

在探测器响应时间参数测试中,探测器输出电压脉冲波形的半高宽可按高斯公式近似求解:

$$\Delta T^2 = \Delta t^2 + \Delta t_d^2 + \Delta t_s^2 + \Delta t_x^2 \quad (3)$$

式中 ΔT 为示波器显示的电压脉冲波形半高宽; Δt 为激光光源的波形半高宽; Δt_d 为探测器响应时间半高宽; Δt_s 为示波器冲击响应波形半高宽; Δt_x 为构成测试系统的传输线缆及转接头等部分的响应时间半高宽。

若示波器的带宽为 B_W ,则根据电子学经验公式,其时间响应半高宽为:

$$\Delta t_s = \frac{0.35}{B_W} \quad (4)$$

传输线缆及转接头等部分的时间响应半高宽为:

$$\Delta t_x = \frac{(0.115L\alpha)^2}{4\pi F} \quad (5)$$

式中 L (单位m)为线缆长度; α (单位dB/m)为线缆在信号频率 F (单位Hz)处的衰减系数^[10]。

3.2 测试结果

该探测器在“神光Ⅲ原型激光装置”上进行了测试。实验所用光源脉宽为飞秒级,可忽略其半高宽;所用信号传输线缆为长1 m、带宽为18 GHz的SMA-J301/SUJ-50-3-51宽带信号传输电缆组件,所用仪器为带宽18 GHz的高频衰减头和带宽12 GHz的Agilent公司DS081204B高速示波器。可变高压源为SY127(3 000 v)的直流偏压,真空度为 3.8×10^{-3} Pa。测得的小型化X射线探测器的典型输出信号波形如图6所示。

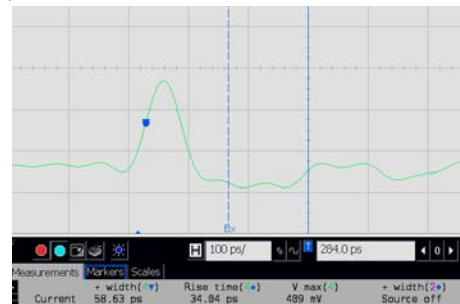


图6 实测的小型化X射线探测器典型输出信号波形

从实验结果可看出,信号的上升时间约为37 ps, ΔT 为58.63 ps,则由式(3)~式(5)可计算出 Δt_s 约为29 ps, Δt_x 约为0.4 ps,最后可计算出探测器的响应时间半高宽约为51 ps。

4 结论

该小型化快响应X射线探测器的研制成功,使得ICF研究在有限的诊断空间内使用X射线能谱仪对软X射线的空间能谱分布和时间过程变化情况进行精确测试成为可能,对实现激光等离子体的精确诊断具有重要意义。

(下转第633页)

- & Astronautics, 2004, 21(1): 76-80.
- [7] DENSON W. The history of reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 47(3): 321-328.
- [8] NACHTMANN H, CHIMKA J R. Fuzzy reliability in conceptual design[C]//2003 Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [9] BAZU M. A combined fuzzy-logic & physics-of-failure approach to reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2): 237-242.
- [10] 赵建华, 段友丽, 楚文海. 改进层次分析法和模糊综合评判实现压铸镁合金选材[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 735-738.
ZHAO Jian-hua, DUAN You-li, CHU Wen-hai. Improved analysis hierarchy process and fuzzy synthetic judgment on the selection of die casting magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2008, 29(6): 735-738.
- [11] 云绍辉. 基于AHP的组织学习能力模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2007, 9(5): 26-28.
YUN Shao-hui. Fuzzy synthetic evaluation for organizational learning ability based on AHP[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2007, 9(5): 26-28.
- [12] 何柱姿, 孙利琼, 杨华昆. 成都市非国有制小企业融资效率模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2008, 10(3): 27-31.
HE Zhu-zi, SUN Li-qiong, YANG Hua-kun. Vague and comprehensive evaluation about financing of non-public ownership small enterprises in Chengdu[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2008, 10(3): 27-31.

编辑 黄 莘

(上接第573页)

- [8] KOC A, OZAKTAS H M, CANDAN C, et al. Digital computation of linear canonical transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2383-2394.
- [9] HLAWATSCH F, BOUDREAUX-BARTELS G F. Linear and quadratic time-frequency signal representation[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(2): 21-67.
- [10] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

编辑 黄 莘

(上接第580页)

参 考 文 献

- [1] YU Min. Look into the initial confinement fusion[J]. The China Academy of Engineering Physics, 1980, 1(1): 1-24.
- [2] 胡广月, 刘慎业, 张继彦. 长脉冲KeV X射线源的辐射特征[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 771-776.
HU Guang-yue, LIU Shen-ye, ZHANG Ji-yan. Emission characteristic of long laser pulse keV X-ray source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 771-776.
- [3] KANIA D, IVERSON A, SMITH L, et al. Flat response detectors—the vacuum ultraviolet and soft X-ray region[J]. Appl Phys, 1986, 60: 2596-2599.
- [4] IDZOREK G, COULTER W, WALSH P. Soft X-ray diagnostics for pulsed power machines[C]//Proc 10th IEEE International Pulsed Power Conference. Los Alamos: National Laboratory, 1995: 981-986.
- [5] KANIA D, LANE S, JONES B, BENNETT C, et al. High speed detection of thermonuclear neutrons with solid state detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988, 35(1): 387-388.
- [6] 朱健强. 神光II高功率激光实验装置[J]. 自然杂志, 2006, 28(5): 271-273.
ZHU Jian-qiang. Shenguang-II: High power laser facility[J]. Nature Journal, 2006, 28(5): 271-273.
- [7] 江少恩, 郑志坚, 孙科煦. 软X光能谱仪的一种新的解谱方法[J]. 计算物理, 2001, 18(3): 276-280.
JIANG Shao-en, ZHENG Zhi-jian, SUN Ke-xu. A new method unfolding spectral for the soft X-ray spectrometer[J]. Computational Physic, 2001, 18(3): 276-280.
- [8] MIURA E, HONDA H, KATSURA K, et al. Soft X-ray emission from noble gas clusters excited by an ultrashort[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2000, 70(60): 783-787.
- [9] 江少恩, 孙科煦, 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.
JIANG Shao-en, SUN Ke-xu, Peng Neng ling, et al.. Development on mini X-ray diode[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(6): 571-574.
- [10] 郭玉彬. 脉冲等离子体软X射线探测系统[J]. 微细加工技术, 1996, 1(1): 29-39.
GUO Yu-bin. Detecting system of soft X-ray in pulse laser-produced plasma[J]. Microfabrication Technology, 1996, 1(1): 29-39.
- [11] WANG Wen-xiang, YUE Lin-gna, YU Guo-fen, et al. Dispersion equation of the coaxial-radial line[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2004, 2(1): 6-9.

编辑 张 俊