

文章编号: 0258-7025(2008)09-1338-04

结构简单的 X 射线二极管及其性能指标测定

程元丽 朱秋石 黄斌 赵永蓬 王骥

(哈尔滨工业大学可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研制了一种可用于测量软 X 光辐射的 X 射线二极管(XRD)。该 XRD 具有结构简单、对偏压及真空度要求较低、响应面积大等特点。分析了 XRD 的响应时间和饱和电流等特性,给出了能量计算公式,同时采用同步辐射光源对 XRD 进行了能量标定,标定结果与理论计算结果一致。利用该 XRD 对毛细管放电类氩氦 46.9 nm 激光脉宽和能量进行了测量。

关键词 激光技术; X 射线二极管; 能量标定; 同步辐射

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1338

Simplified X-Ray Diode and Its Performance Measurement

Cheng Yuanli Zhu Qiushi Huang Bin Zhao Yongpeng Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract We designed a simplified X-ray diode (XRD) to detect soft X-ray emission, which has advantages of simplified structure, bigger response area, and lower requirements for bias voltage and vacuum level. The response time and saturation current were analyzed. Meanwhile, the formula to calculate the energy was established and the XRD was calibrated at synchrotron radiation source. The energy calibration result matches the theoretical calculation one. With this XRD, we measured the pulse width and energy of discharged-pumped Ne-like Ar soft X-ray laser of 46.9 nm.

Key words laser technique; X-ray diode; energy calibration; synchrotron radiation

1 引言

X 射线二极管(XRD)是测量 X 射线辐射能量的一种主要手段,在等离子体诊断, X 射线辐射, X 射线激光等研究领域广泛应用。常规应用于激光打靶 X 射线检测的 XRD 虽然时间响应快(皮秒量级),但其结构相对复杂,而且对偏压(-3000 ~ -5000 V)和真空度($\sim 10^{-3}$ Pa)的要求较高。对于一些较慢的 X 射线辐射过程,如放电机制产生的 X 射线辐射,脉宽为纳秒级,能量约为微焦耳至毫焦耳量级,束散角为几个毫弧度^[1~4],测量其 X 射线辐射能量亚纳秒级的时间分辨就足够了。因此,本文设计了一种结构简单、真空度要求较低的 XRD,对其性能指标进行了分析计算及能量标定。利用该 XRD 对毛细管放电类氩氦 46.9 nm 激光脉宽和能量进行了测量。

2 结构设计

XRD 的结构如图 1 所示,阴极为铜片镀金,直径 10~20 mm;阳极为铝网,透过率 $\sim 85\%$;两极间距 1~3 mm,工作电压-400~-1000 V。根据巴申曲线可以确定,它能够在 $\sim 1.33 \times 10^{-2}$ Pa 较低真空度下工作,降低了对真空系统的要求,为实验操作提供了方便。为了简化结构,将偏压支路与测量支路合并为一路,直接与 XRD 镀金阴极连接,如图 2 所示。在测量放电机制 X 光激光能量时,采用一个串联在探测支路的电容将直流偏压与探测示波器隔离,电容对直流偏压相当于断路,而对于脉宽为几纳秒的 X 辐射产生的光电流脉冲则相当于短路,此时直流高压只加在 XRD 阴极上,且光电流全部流入探测支路被示波器探测。

收稿日期:2007-08-25; 收到修改稿日期:2007-12-07

作者简介:程元丽(1971—),女,山东人,博士,副教授,主要从事 X 射线激光、等离子体诊断及激光空间信息技术方面的研究。E-mail:y_gd@sina.com

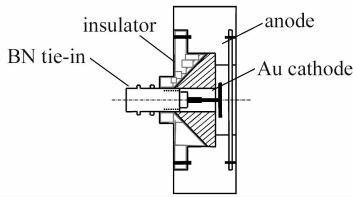


图 1 XRD 系统整体结构图

Fig. 1 Schematic of XRD

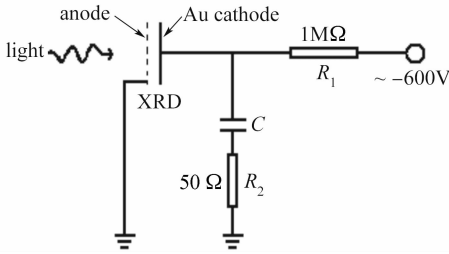


图 2 XRD 电路示意图

Fig. 2 Equivalent electrical circuit of XRD

3 性能指标分析计算

3.1 响应时间

X 射线穿过阳极网打在阴极上产生光电子, 光电子在阴阳极间强电场作用下向阳极运动, 电子从阴极到阳极的运动时间称为渡越时间 (τ_x), 当阴阳极距离为 h , 偏压为 V , 电子质量为 m_e 时

$$\tau_x^2 = 2 h^2 m_e / eV, \quad (1)$$

XRD 的上升沿响应时间 τ_x 与 $V^{-0.5}$ 成反比, 降低阴阳极偏压会使上升沿响应时间变长, 但降低偏压可以降低 XRD 对真空度的要求。设计采用 -600 V 的偏压及 2 mm 的阴阳极间距, $\tau_x = 0.275 \text{ ns}$ 。光电子的渡越时间即为 XRD 输出脉冲的前沿时间, 所以上升沿响应时间 $t_x \approx 0.8\tau_x$ [4]。对于 XRD, $t_x = 0.22 \text{ ns}$ 。0.22 ns 的响应时间完全满足几十纳秒放电机制的 X 射线辐射测量的时间分辨要求, 而 $-600 \sim -1000 \text{ V}$ 的偏压及 2 mm 的阴阳极间距大大降低了对真空度的要求 ($\sim 1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$)。

3.2 X 射线辐射能量的计算

X 光能量的计算一方面要考虑到阴极金属对某一波长入射光的量子效率和反射率, 另一方面还要考虑到 X 光在传输过程中的吸收。设 n 为入射的光子数, Q 为由光电效应产生的电子数, 则

$$Q = (1 - R_{\text{ref}}) n T q_{\text{py}} e, \quad (2)$$

电子数 Q 与 XRD 输出电压的关系为

$$Q = \int I dt = \int \frac{V}{R} dt = \frac{V_0 \delta_t}{R}, \quad (3)$$

X 射线能量 E 为

$$E = h\nu n = h\nu \frac{V_0 \delta_t}{R(1 - R_{\text{ref}}) T q_{\text{py}} e}, \quad (4)$$

式中 V_0 为 XRD 测到的电压值, δ_t 为 X 光辐射的脉宽, R_{ref} 为光电阴极反射率, q_{py} 为量子效率, T 为 X 光在传输过程中的吸收、金属网阳极的遮挡及衰减共同作用后的值, 与透过系数相对应。利用 (4) 式可以根据示波器的电压读数计算出入射 X 射线辐射的能量。

3.3 饱和电流的计算

根据 Child-Langmuir 法则, XRD 的饱和电流为

$$I_{\text{ch}} = 7.24 \times 10^{-6} (D/d)^2 V^{3/2}, \quad (5)$$

式中 D 为 XRD 光电阴极直径 (或光斑大小), d 为阴阳两极的直径, 取 $D = 4 \text{ mm}$, $d = 2 \text{ mm}$ 。如果 XRD 偏压为 -600 V , 则饱和电流为 0.43 A , 在示波器上观察到的相应电压值应为 $0.43 \text{ A} \times 50 \Omega = 21.5 \text{ V}$ 。如果偏压为 -1000 V , 则饱和电流为 0.92 A , 在示波器上观察到的相应电压值应为 46.0 V 。

4 能量标定

XRD 能量标定采用的是国家同步辐射光源。在合肥国家同步辐射实验室 (NSRL) 光谱辐射标准与计量实验站 (TSGT 束线) 进行实验。光源束线光路由前置超环面镜、球面光栅单色器 (SGM) 以及后置超环面镜组成, 光束最终入射到真空测量室内的 XRD 上, 真空室内气压低于 10^{-5} Pa 。

XRD 的探测电路不适用于探测连续信号, 为了利用连续的同步辐射光源对 XRD 进行能量标定, XRD 电路改为图 3 所示, 其中电流计为 Keithley 公司的 6517A 弱电流计。

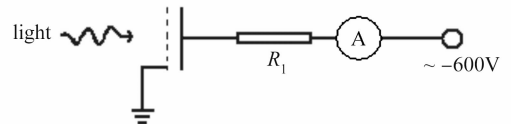


图 3 XRD 能量标定电路

Fig. 3 Equivalent electrical circuit of XRD energy calibration

首先利用标准光电二极管 (International Radiation Detector 公司, AXUV 系列) 找到束流与入射光子数的关系, 然后针对 46.9 nm 入射光对 XRD 进行能量标定: 根据光电流随束流的变化曲线、束流与入射光子数的关系, 得到了 46.9 nm 光电流与单位时间内入射光子数之间的关系; 最后, 改变

入射光波长,得到当单位时间入射光子数不变时,光电流与入射光波长的关系。

同步辐射光源强度随时间衰减,其强度与所测得束流的比值为常量。采用同步辐射实验室的标准光电二极管测量通过单色仪后某一波长的入射光产生的光电流 I_o ,该光电二极管的量子效率 η 已知,单位时间入射光子数为

$$n_o = I_o / (\eta \times e). \quad (6)$$

该光电二极管由 International Radiation Detector 公司生产,46.9 nm 对应量子效率为 5.8。若该时刻束流为 I_o ,则 t 时刻的束流 I_t 对应的入射光子数为

$$n_t = n_o \cdot I_t / I_o. \quad (7)$$

根据入射光子数与束流的关系可得到如图 4 所示 46.9 nm 处 XRD 光电流与入射光子数的关系。

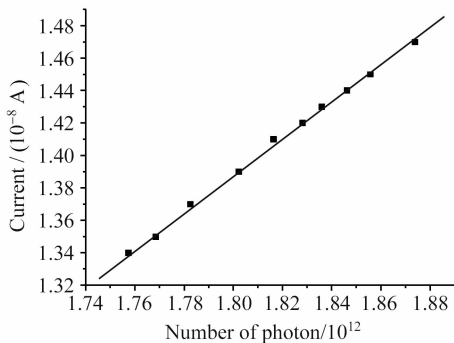


图 4 光电流随入射光子数的变化关系(46.9 nm)

Fig. 4 Relationship between the photons and photoelectric current

对数据进行线性模拟,实际入射光子数 $n_t(10^{12}) = 0.88624 \times I_t(10^{-8} \text{ A}) + 0.56973$ 。根据(4)式,理论入射光子数 $n_t(10^{12}) = 0.5610 \times I_t(10^{-8} \text{ A})$,可见实际测量结果与理论计算结果吻合得很好,确认了 XRD 能量计算公式的正确性。

图 5 给出了 30~70 nm 辐射范围内的 XRD 能量标定结果。

5 毛细管放电 46.9nm 软 X 射线激光的测量

毛细管放电软 X 射线激光是一种实现小型化、台式 X 射线激光的方案。毛细管放电软 X 射线激光实验装置包含一个快速高压电脉冲(Marx)发生器^[1~3],输出电压 240~300 kV,一个三筒结构的 Blumlein 传输线作为低电感回路,它产生一个快前沿、短持续时间(20~100 ns)的脉冲电压加到毛细管负载上;外加一个幅值为 20 kV 的预脉冲,在主脉

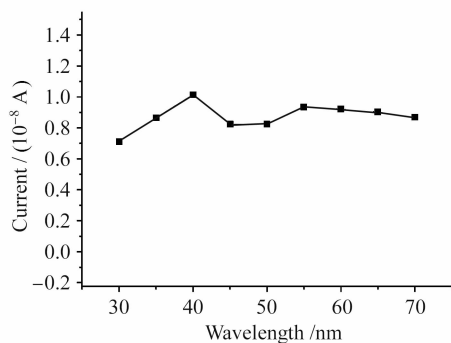


图 5 光电流随入射光波长的变化关系

Fig. 5 Relationship between the incident wavelength and photoelectric current

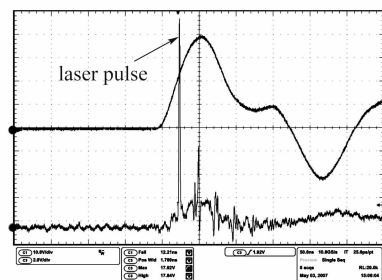


图 6 XRD 在毛细管放电 X 射线激光装置上测得的实验结果

Fig. 6 Using XRD to measure the capillary discharged X-ray laser

冲之前将毛细管内的气体电离成 +1, +2 价等离子体。

利用所设计的 XRD 对充氩气毛细管放电,观察到了氩氩 46.9 nm 的激光输出,如图 6 所示。放电条件为:预脉冲电流 20 A,预、主脉冲延时 5~10 μs ;主脉冲放电电流幅值 28 kA,电流 1/4 周期 50 ns;高纯度陶瓷毛细管内径 3.1 mm,长度 18 cm;氩气压强 35 Pa。图中第一个尖峰为类氩压 46.9 nm 激光脉冲,其后的小尖峰为激光信号在电回路中的反射结果。根据 XRD 的标定结果可确定激光输出能量约为 15 μJ ,测得的激光脉冲半峰全宽为 1.7 ns,该测量结果与国外同类实验报道的数据结果基本一致^[5]。

6 结 论

设计了一种结构简单的 X 射线二极管。该 XRD 对偏压及真空度要求较低、响应面积较大、响应时间为 0.22 ns,饱和电流为 0.92 A,适合测量放电机制的 X 射线辐射。给出了计算能量的理论公式,并用同步辐射光源对 XRD 进行了能量标定,证实理论计算公式和实际标定结果相一致。该 XRD

在毛细管放电软 X 射线激光装置中的对类氦氩 46.9 nm 激光能量测量的结果证实使用方便, 测量数据准确可靠。

参 考 文 献

- 1 Cheng Yuanli, Zhao Yongpeng, Gao Yingjian *et al.*. Study on low pressure discharge character of capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):43~48
程元丽, 赵永蓬, 高英建等. 低气压毛细管放电特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):43~48
- 2 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Wu Yinchu *et al.*. Experimental investigation of lasing condition for soft X-ray laser pumped by capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1189~1192

- 栾伯哈, 赵永蓬, 吴寅初等. 毛细管放电抽运软 X 光激光产生条件的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1189~1192
- 3 Zhao Yongpeng, Li Yan, Xie Yao *et al.*. Influence of the main-switch of the capillary discharge setup on soft X-ray laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1176~1179
赵永蓬, 李岩, 谢耀等. 毛细管放电装置主开关结构对产生软 X 射线激光的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1176~1179
 - 4 Ma Hongliang, Sun Keju, Xu Heping *et al.*. The sensitive resolution calibration of X-ray diode and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7):939~943
马洪良, 孙可煦, 徐和平等. X 射线二极管的灵敏度标定及应用[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7):939~943
 - 5 J. J. Rocca, F. G. Tomasel, M. C. Marconi *et al.*. Discharge-pumped soft-X-ray laser in neon-like argon [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(6):2547~2555

《中国激光》“光纤通信及器件”专题征稿启事

光纤技术和网络技术的迅猛发展, 对现代光通信技术的发展产生了巨大的推动作用, 尤其在光纤通信系统及器件的设计与实现方面, 已取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于 2008 年 12 月正刊上推出“光纤通信及器件”专题栏目, 现特向国内外广大读者以及作者征集“光纤通信及器件”方面原创性的研究论文和综述, 旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤通信系统的设计及实现
- 光纤激光器的设计与实现(如掺杂光纤激光器、新型可调谐光纤激光器、微结构光纤激光器等)
- 光纤放大器的设计与实现(如宽波段掺铒光纤放大器、拉曼光纤放大器、微结构光纤放大器等)
- 全光纤无源器件的设计与实现(如宽带光纤耦合器、宽带光纤滤波器、新型光纤色散补偿器、阵列光开关等)
- 新型光纤光栅的设计与实现(如微结构光纤光栅、超长周期光纤光栅及特种光纤光栅等)
- 其他

截稿日期: 2008 年 10 月 15 日

投稿方式以及格式: 可直接将稿件电子版发至“光纤通信及器件”专题组稿专家、《中国激光》常务编委张伟刚教授, 邮箱: zhangwg@nankai.edu.cn(主题标明“光纤通信及器件专题”投稿), 或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“光纤通信及器件专题”投稿), 详情请参见中国光学期刊网: www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限, 中英文皆可, 其电子版请使用 MS-word 格式, 有任何问题请发邮件至 mayi@siom.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部