

测量托卡马克可见光谱辐射的 低噪声、高响应光敏二极管探测器

殷 飞 郭文康 高 翔 李建刚

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 研制了一种用于托卡马克等离子体可见光谱线测量的半导体光敏二极管探测器。这种探测器具有体积小、造价低、使用方便等优点, 它具有很高的量子效率、理想的线性区、宽的频率范围和低的噪声, 完全能够满足托卡马克诊断中对等离子体可见光微弱谱线的测量。

关键词 等离子体, 可见光谱线, 光敏二极管, 量子效率, 线性, 频率响应, 噪声。

1 引 言

随着对托卡马克等离子体研究的深入, 需要对等离子体参数的分布进行精确测量, 有时需要测量的道数多达几十道, 以便反演出其空间分布。对诊断设备的要求也比较严格, 要求诊断设备占用尽量小的空间, 并且具有较强的抗磁场干扰能力。光敏半导体器件由于其独特的性能, 在托卡马克诊断中已经得到越来越多的应用^[1~6]。

作者研制了以半导体光敏二极管为光敏元件的光电探测器, 并和干涉滤光片结合组成多道 H_α 线和碳、氧等杂质的可见光谱线测量系统, 可以精确地测量这些谱线辐射的径向分布, 从而研究粒子和杂质的约束、输运和边界行为。它与光电倍增管相比有其优点。

本文描述了光敏二极管器件的选择和电路设计的考虑, 以及对该探测系统性能的测定结果和该探测器在 HT-6M 托卡马克诊断测量中的应用。

2 探测电路的设计和分析

本文选择的半导体光敏二极管是 PIN 光敏二极管 SPD3X3*, 它具有较大的接收面积 9 mm^2 , 波长响应在 900 nm 处为最大 0.5 A/W , 在 H_α 线波长 (656 nm) 处为 0.35 A/W , 在 400 nm 处为 0.06 A/W , 相应的量子效率在 656 nm 处达 0.65 , 在 400 nm 处为 0.2 , 在红光处它比光电倍增管的量子效率高一量级左右, 工作电压为 15 V , 结电容 3 pF , 上升时间小于 2 ns , 暗电流小于 10 nA 。这样在室温条件下可忽略暗电流的影响, 并且做到较宽的频率范围。

该探测器的电路如图 1 所示, 它包括: 光敏二极管、电流-电压变换部分、频率补偿部分和放大输出部分。在这个电路中, 采用了一个高性能的前置放大器, 由它完成电流-电压变换。该

收稿日期: 1995 年 1 月 25 日; 收到修改稿日期: 1995 年 8 月 7 日

* 成都兵器工业部 204 所生产的。

前置放大器选用了场效应管作为输入级,具有极高的输入电阻,并且大大地降低了放大器前级引入的噪声。该前置放大器中采用了反馈电阻 R_f ($R_f = 20 \text{ M}\Omega$) 将光敏二极管的负端钳制在 0 V 左右,同时该放大器的输出电压为光敏二极管的输出电流和 R_f 的乘积。由于把光敏二极管当作一个电流源,而不是直接取其两端的电压信号加以放大,在加宽了频率响应范围的同时,可以做到很高的放大倍数。

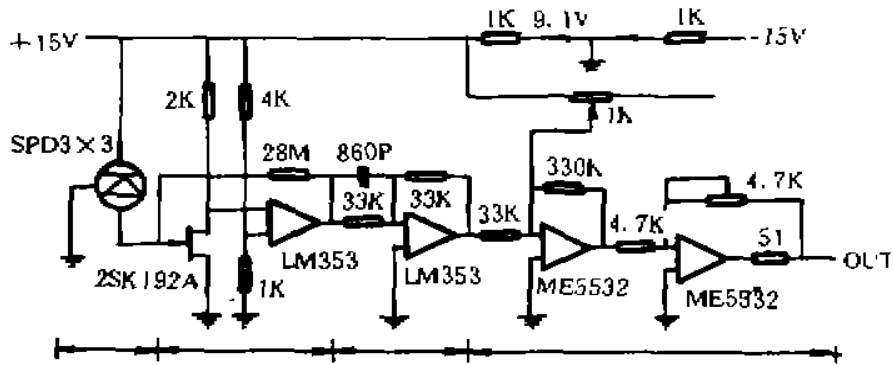


Fig. 1 Schematic diagram of the detector

本探测器的噪声极限主要取决于光敏二极管和前置放大器产生的噪声,其中主要有下面几个方面: 1) 反馈电阻 R_f 产生的热噪声 i_f , 2) 光敏二极管在使用中相当于一个并联了电容 C_d 和分流电阻 R_d 的电流源,它的噪声包括 R_d 的热噪声 i_d 和光敏二极管的散粒噪声电流 i_s , 3) 前置放大器可以看作一个无噪声的放大器,但在输入端有电压噪声 e_n 和电流噪声 i_n ,放大器的输入阻抗和电容分别为 R_i 和 C_i 。这样,对于角频率 ω ,总的输出噪声功率 P_n 为:

$$P_n = R_f^2 [i_f^2 + i_s^2 + i_d^2 + i_n^2 + (e_n/Z_i)^2]$$

其中 $i_f = \left(\frac{4kT}{R_f}\right)^{1/2}$, 为反馈电阻的热噪声电流,
 $i_d = \left(\frac{4kT}{R_d}\right)^{1/2}$, 为光敏二极管的热噪声电流,

$$Z_i = \frac{R_i}{[1 + (\omega C_i R_i)^2]^{1/2}}, \text{为光敏二极管的阻抗。}$$

上面这些量的值在电路中分别为: $R_f = 20 \text{ M}\Omega$, $C_d = 3 \text{ pF}$, $R_d > 200 \text{ M}\Omega$, $C_i = 10 \text{ nF}$, $R_i > 1000 \text{ M}\Omega$, $e_n = 1 \sim 2 \text{ nV/Hz}^{1/2}$, $i_s \sim 20 \text{ fA/Hz}^{1/2}$, $i_d \sim 8 \text{ fA/Hz}^{1/2}$, $i_n \sim 40 \text{ fA/Hz}^{1/2}$ 。通过计算可以得到, i_s 引起的噪声功率是其它噪声源的 4 倍以上,输出噪声主要是由它产生的。

在频率补偿部分,由于反馈电阻阻抗和输入电阻阻抗的比值随着频率的增加而增加,可加宽频率响应的范围,图 3 给出了在有、无频率补偿情况下放大器的频率响应。

在放大输出部分,该探测器电路能够调节输出零点和驱动长电缆,满足了在托卡马克诊断中探测光强和探测位置灵活多变的要求。

按照上面设计,做出的探测器具有很高的增益和频率响应,完全满足了对托卡马克装置上线辐射测量的需要。

3 探测器性能的测试

图 2 表示的是该探测器的输出和输入光强之间的关系(在下面的讨论中,除特别说明外,都是针对 H_α 线讨论的),根据放大器的放大倍数和反馈电阻 R_f 值,可以将放大器的输出电压换算为相应的光敏二极管输出电流,这样更方便于讨论。从图 2 中可以看到,当输入光强在 200

nW 以内时,光敏二极管的输出电流和输入光强间线性很好。(由于放大器本身电源电压是±15 V,当输入光强大于 200 nW 时,±15 V 以外的波形被削去,所以光敏二极管实际的线性范围要大于 200 nW,减小 R_f 可以探测更大的光强)。

在电路中,该放大器最终的输出噪声为 40 mV,换算成光敏二极管的光电流为 0.2 nA,对应于 H_α 线处的输入光强为 0.6 nW。这样探测器在室温下可测量的最小光强为 0.6 nW,由此可以得到本探测器的有效探测区间为 0.6 nW~200 nW。

光敏二极管有 10 nA 的暗电流,经过 20 MΩ 的电阻后有 0.2 V 的零漂,可以通过探测器的调零点电路将探测器的输出调节为 0 V。

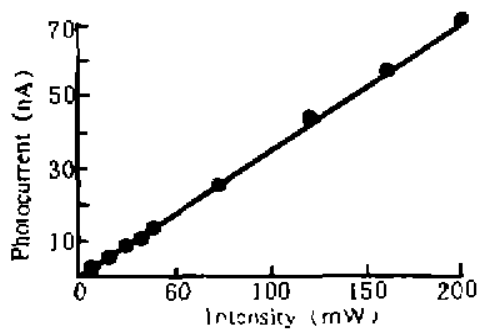


Fig. 2 Linearity of the detector

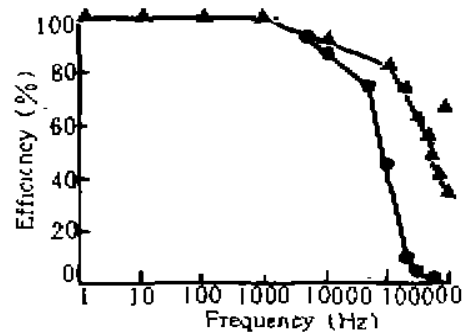


Fig. 3 Frequency sensitivity of the detector

(●—Before compensation; ▲—After compensation)

利用信号源外接快速发光二极管发出的调制光来检验光探测器的频率响应,测得它的上升时间小于 2 μs,图 3 给出了它的频率响应曲线。通过适当的频率补偿,将它的频率范围由无补偿时的 80 kHz(3 dB 点)扩大到 200 kHz(3 dB 点),可满足研究等离子体中可见光辐射高频扰动的需要。

4 实验结果

在 HT-6M 托卡马克的 H_α 线测量中,作者研制的这种光敏二极管探测器不需要使用光纤就能够对从限制器到中心的不同位置进行测量,具有使用方便、灵活的特点。

图 4 给出了该光敏二极管测量的 H_α 线信号 (a) 和相应位置处光电倍增管测量的 H_α 线信号 (b) 的比较,从中可以看到,由于该探测器采用了干涉滤光片,具有较大的孔径,因而信噪比优于采用单色仪的光电倍增管,两者其它方面的细节是一致的。因此该光敏二极管探测器完全可以满足 HT-6M 装置上可见光谱线测量的需要。

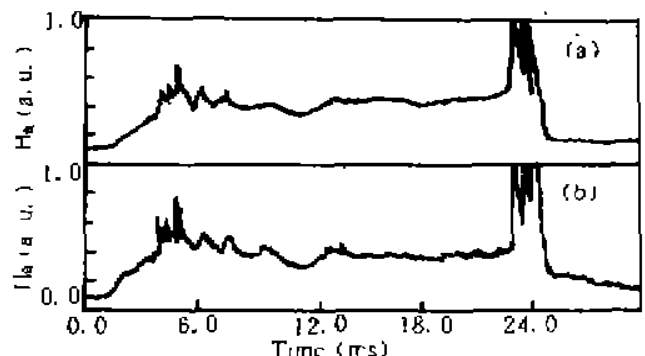


Fig. 4 Light signal measured with the photo-diode detector (a) and with the photo multiplier tube (b)

通过定量标定得到在 HT-6M 装置上, H_α 线的辐射强度为 $4 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ Sr})$ 左右, CIII 和 OII 的强线的辐射强度也在这个量级内,对于进行 10 道左右的多道测量,每道的输入光强最大可做到大于 400 nW,远大于其噪声极限,通过使用衰减片或进行更多道的测量,很容易使输入光强位于线性区内。

作者制作的这种高量子效率和光灵敏度、宽频率范围、低噪声极限的光电探测器,具有体

积小、价格低、使用灵活的特点,可方便地用来建立单道和多道可见光测量系统,并达到很高的信噪比。图 5(a)和图 5(b)分别给出了单道和多道测量系统的设计,其空间分辨率取决于透镜的直径和焦距以及光敏二极管的位置安排,它们完全可以用来取代光电倍增管和光纤组成的系统。这种测量系统已经在 HT-6M 和 HT-7 超导托卡马克的可见光谱线的测量中得到应用,为等离子体物理研究提供了有力的工具。

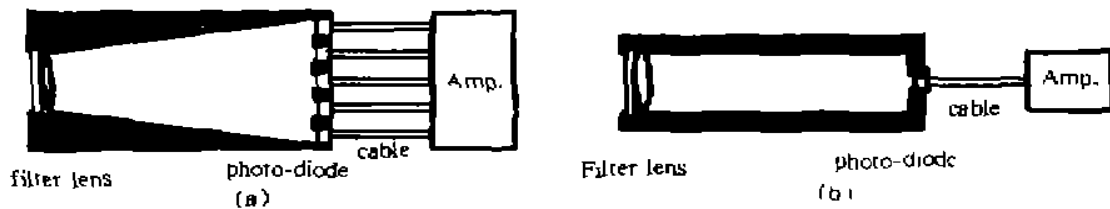


Fig. 5 Multiple channel (a) single channel (b) detect system

致谢 本文的工作是在 HT-6M 组和光谱组的支持下完成的,感谢尹富先博士和万宝年博士的讨论和帮助。

参 考 文 献

- [1] R. A. Bamford, P. G. Carolan, C. A. Bunting, Combination of multichannel detection and fast time response in a multichord spectrometer, *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 4962~4964
- [2] K. Ōda, S. Hidekuma, Space- and time-resolved measurements of ion temperature with the CVI 5292-A charge-exchange recombination line after subtracting background radiation, *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(5): 867~871
- [3] Alan T. Ramsey, Stephen L. Turner, HAIFA: A modular, fiber-optic coupled, spectroscopic diagnostic for plasma, *Rev. Sci. Instrum.*, 1987, **58**(7): 1211~1220
- [4] P. D. Hurwitz, B. F. Hall, William L. Rowan, Detector array for measurement of high-frequency fluctuation in visible and near-UV emission from tokamaks, *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 4614~4616
- [5] L. C. Ingesson, J. J. Koning, A. J. H. Donne et al., Visible light tomography using an optical imaging system, *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 5185~5187
- [6] R. J. Fonck, R. Ashley, R. Durst et al., Low-noise photo detector for optical fluctuation diagnostics, *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 4924~4926
- [7] 谢 飞, HT-6M 上 Z_{eff} 和 H_{α} 测量的新方法,中科院等离子体所硕士论文,1994

A Low Noise and High Sensitive Photo-Diode Detector Used in Tokamak Visible Light Measurement

Yin Fei Guo Wenkang Gao Xiang Li Jiangang

(Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy Sciences, Hefei 230031)

(Received 25 January 1995; revised 7 August 1995)

Abstract A kind of photo-diode detector used in Tokamak visible light measurement was developed. This kind of detector characterized by its high quantum efficiency, good linearity, wide frequency and low noise has many advantages, such as small size, low cost and easy for use. It is satisfied to measure weak visible light in Tokamak.

Key words plasma, visible light, photo-diode, quantum efficiency, linearity, frequency response, noise