

[1] 上海博物馆等,中国“透光”占铜镜的奥秘,上海科学技术出版社,(1982).  
 [2] S. Kato et al., *Inst. Elec. Commun. Eng. Japan SSD-77*, **81** (1977), 33.

[3] K. Kugimiya et al., *J. Cryst. Growth*, **103** (1990), 461.  
 [4] K. H. Yang et al., *J. Elect. Soc.*, **132** (1985), 1214.

## 一种新型的软 X 射线二极管

王红斌 刘忠礼

(西南核物理与化学研究所,成都 610003)

孙宗慈 徐德祺

(北京综合仪器厂,北京 100018)

介绍了用于激光等离子体发射的 X 射线量测量的一种新型的软 X 射线二极管(即 XRD)的结构、原理、性能、标定及其应用。该探测器具有体积小、响应快、使用方便等优点。1990 年和 1991 年已两次成功地用于“神光”装置上激光等离子体发射 X 射线测量。

在激光惯性约束聚变中,激光等离子体发射较强 X 射线辐射,其能谱主要集中于软 X 射线能区(即 0.1—1.5keV)。通过测量发射的软 X 射线可以得到有关激光等离子体相互作用的物理信息。

可以用于测量软 X 射线的探测器有光导探测器(如 InP·Fe 探测器和 GaAs 探测器等)、热电探测器(如 LiTaO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub> 探测器等)和真空 X 射线二极管等。这三种探测器共同之点是时间响应快(亚纳秒量级),且对软 X 射线都可以具有平响应特性。不同之处是光导探测器灵敏度高( $\sim 10^{-4}$ A/W),仅适用于低通量 X 射线测量;热释电探测器灵敏度很低( $\sim 10^{-7}$ A/W),且抗干扰能力差,它的主要优点是不需要加偏压,但仅用于高通量测量;而 X 射线二极管灵敏度介于两者之间( $\sim 10^{-5}$ A/W),既可以用于低通量 X 射线测量,又可以用于较高通量 X 射线量测量。

中国科学院上海光学精密机械研究所在 80 年代初已经研制出一种真空 X 射线二极管,但时间响应慢(几百皮秒),抗干扰能力差。80 年代中期我们研制了一种时间响应快的 X 射线二极管,但体积大,使用不方便。随着惯性约束聚变研究的发展,软 X 射线量测量显得越来越

重要。1990 年初,我们又研制了一种新型的软 X 射线二极管,它具有体积小、响应快、使用方便等优点。该探测器已多次用于激光等离子体发射的 X 射线测量。

### 一、结构、原理及性能

#### 1. XRD 结构、原理

软 X 射线二极管结构及电路图如图 1 所示。X 射线通过 Ni 网阳极入射到金属阴极上产生光电子,光电子在高达  $2.5 \times 10^6$ V/m 的电场作用下,迅速向阳极运动,在外电路中感应出电流脉冲。由于该电流脉冲携带的电荷量与 X 射线光子在阴极上沉积的能量成正比,所以只要测出该探头输出的总电荷量,即可求出 X 射线入射的总能量。

#### 2. 结构参数

探测器主要由阳极 Ni 网和金属阴极组成。Ni 网透过率为 85%,它与阴极表面的距离为 1.2mm,在阴极与阳极之间加有 3kV 的偏压,阴极有效面直径为  $\phi 10$ mm,圆锥形结构,以便于保持 50 $\Omega$  的特性阻抗,且阴极可以更换。

#### 3. 电性能参数

XRD 等效电路如图 1(b) 所示。

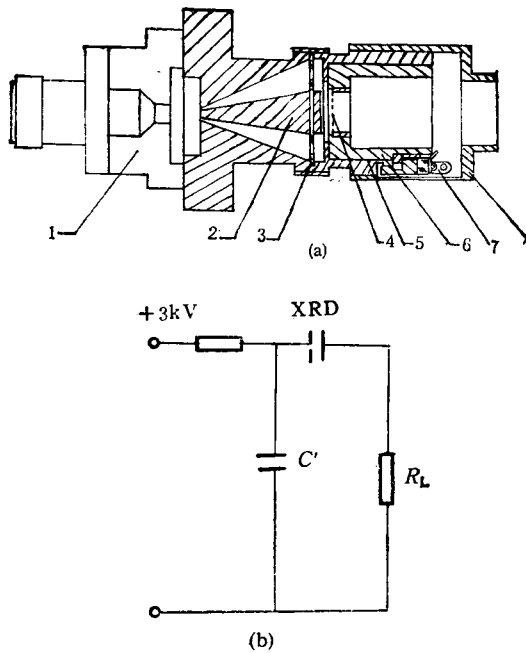


图 1 XRD 结构及等效电路图

(a) XRD 结构图(1 为 L16 电缆座, 2 为锥形阴极, 3 为固定环, 4 为 Ni 网, 5 为  $C_6H_6$  涂层, 6 为阳极筒, 7 为高压接触片, 8 为滤片支架); (b) 等效电路图

(1) 响应时间

当一个  $\delta(t)$  函数的脉冲 X 射线源照射到阴极上时, 光阴极几乎是没有任何时间延迟地发射光电子<sup>[1]</sup>, 这些光电子在加速电场  $E$  的作用下, 飞向阳极。由于极间电场是均匀的, 光电子的速度随时间直线地上升。在电子的飞行过程中, 将在外电路中感应电流。感应电流的大小与光电子的速度成正比。如图 2 所示。一个光电子感应的电流为

$$i_q = (q_e^2 E / m_e \cdot d) t \quad (0 < t < t_d), \quad (1)$$

$q_e$  和  $m_e$  分别为电子的电荷和质量。(1) 式表示在飞行时间内, 感应电流随时间直线上升, 直到  $t = t_d$ , 电子到达阳极时为止。 $t_d$  为电子渡越时间, 可用下式表示:

$$t_d = d(2m_e/q_e)^{1/2} V_b^{-1/2}, \quad (2)$$

式中  $V_b$  为阳极电压,  $d$  为阴极与阳极之间的距离。

当电子到达阳极时, 感应电流瞬时地下降到零, 故感应电流的最大值为

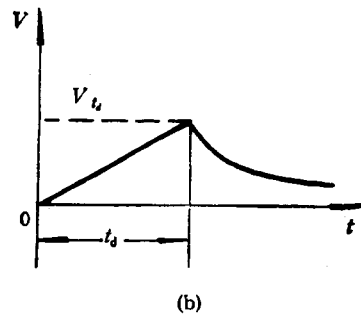
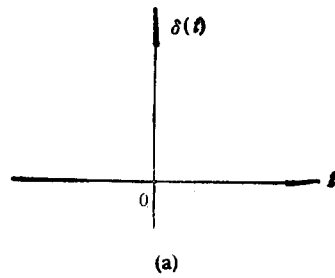


图 2 二极管的时间响应

$$i_q(t_d) = (2q_e^3/m_e)^{1/2} d^{-1} V_b^{1/2}. \quad (3)$$

这个感应电流流经由极间电容  $C$  和负载电阻  $R_L$  组成的电路, 同时在负载电路  $R_L$  上产生信号电压  $V_0$ 。

对于  $\delta(t)$  函数的脉冲光源, 在电子飞行时间内, 信号电压  $V$  直线上升到最大值  $V_{td}$ , 而后以时间常数  $T = R_L C$  指数下降, 如图 2(b) 所示。

$$V = V_{td} \exp[-(t - t_d)/T] \quad (t > t_d). \quad (4)$$

根据(2)式, 输出信号的上升时间  $t_r$  为

$$t_r = 0.8 t_d \approx 65 \text{ ps}. \quad (5)$$

根据(4)式, 输出信号的下降时间  $t_f$  为

$$t_f = T \ln \frac{0.9}{0.1} = 2.2 R_L C \approx 65 \text{ ps}, \quad (6)$$

式中  $C$  为阴阳极间极间电容,  $R_L = 50 \Omega$ 。

由(5),(6)式可知, 探头响应时间 (亦即输出信号的脉冲半宽度) 为

$$\tau_{1/2} = \frac{t_d}{2} + T \ln 2 = 61 \text{ ps}. \quad (7)$$

(2) 线性电流

在平行板电极系统中, 如果极间距离  $l$  远小于电极的线度尺寸时, 光电流  $I$  与极间电压

$U$ 的关系为

$$I = 2.3 \times 10^{-6} \frac{S}{l^2} U^{3/2}. \quad (8)$$

线性饱和电流  $I_s$  为

$$I_s = 2.3 \times 10^{-6} r \frac{S}{l^2} U^{3/2}, \quad (9)$$

式中  $r$  为系数,其值约为 0.2,  $S, l$  分别为阴极面积和阴极与阳极之间的距离。

对于这种探测器,  $I_s \approx 4A$ 。

### (3) 同轴输出阻抗

二极管的输出信号通过阴极同轴输出结构输出。为了使二极管的信号无畸变地输出,阴极做成锥形结构。同轴圆锥筒的特性阻抗的计算公式为<sup>[2]</sup>

$$Z_0 = 60 \ln \left( \frac{\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta_2}{2}} \right), \quad (10)$$

式中  $\theta_1, \theta_2$  分别为外、内锥体的半角,其值为  $\theta_1 = 21^\circ, \theta_2 = 9.5^\circ$ , 代入(10)式后,可得到  $Z_0 \approx 50\Omega$ 。

## 二、性能考核

### 1. 灵敏度标定

利用 K-400 加速器 (200kV, 1.5mA) 的质子流, 激发不同材料靶产生的荧光 (强度为  $10^{22} \sim 10^{23}$  光子/ $4\pi \cdot s$ ), 通过磁偏转和滤片, 输出单色低能荧光 X 射线, 提供 XRD 做灵敏度标定。实验采用的荧光材料有 B, C, Fe, Cu 和 Al, 它的荧光特征能量分别为 183eV, 277eV, 560eV, 929eV, 1.10keV。用两个流气式正比计数管分两个方向监测荧光强度, 其中 A 管连续监测荧光强度, B 管与 XRD 占同一荧光道, XRD 标定后, 移开 XRD, 空出位置, B 管再监测该位置荧光强度。图 3 给出了 XRD 灵敏度标定装置。

XRD 灵敏度  $S_1$  由下式给出

$$S_1 = I/h\nu \cdot \Phi \cdot \Omega, \quad (11)$$

式中  $I$  为 XRD 输出电流,  $h\nu$  为荧光特征能

表 1 XRD 绝对灵敏度标定结果

标定能点	阴极材料	滤片	光子通量 (个/ $4\pi \cdot s$ )	暗电流 (A)	信噪比	结果 (C/keV)
B <sub>K</sub> (183eV)	Al	B	$2.4 \times 10^{13}$	$2.5 \times 10^{-15}$	34.0	$4.08 \times 10^{-20}$
B <sub>K</sub> (183eV)	Au	复合膜*	$4.0 \times 10^{13}$	$4.0 \times 10^{-15}$	10.0	$4.04 \times 10^{-21}$
Cr <sub>L</sub> (574eV)	Al	B	$4.1 \times 10^{13}$	$4.1 \times 10^{-15}$	3.5	$1.13 \times 10^{-20}$
Cr <sub>L</sub> (574eV)	Au	复合膜	$4.0 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{-15}$	7.0	$4.60 \times 10^{-21}$
Fe <sub>L</sub> (704eV)	Al	B	$1.2 \times 10^{12}$	$8.6 \times 10^{-15}$	3.0	$6.90 \times 10^{-21}$
Fe <sub>L</sub> (704eV)	Au	复合膜	$2.0 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{-15}$	10.0	$3.79 \times 10^{-21}$
Cu <sub>L</sub> (932eV)	Al	B	$1.7 \times 10^{12}$	$1.9 \times 10^{-16}$	6.0	$3.02 \times 10^{-21}$
Cu <sub>L</sub> (932eV)	Au	复合膜	$3.0 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{-15}$	30.0	$2.72 \times 10^{-21}$

\* 复合膜是指  $2.95\mu\text{m}$  的 Al 膜和  $80\text{nm}$  的  $C_6H_6$  膜构成的。

量 (keV),  $\Phi$  为荧光强度(光子数/ $4\pi \cdot s$ ),  $\Omega$  为 XRD 灵敏面对荧光源所张的立体角因子。表 1 给出了 XRD 灵敏度标定结果。

### 2. 激光打靶对 XRD 性能考核

我们在“星光”装置上利用短脉冲激光激励金平面靶产生的 X 射线作为光源对 XRD 电性

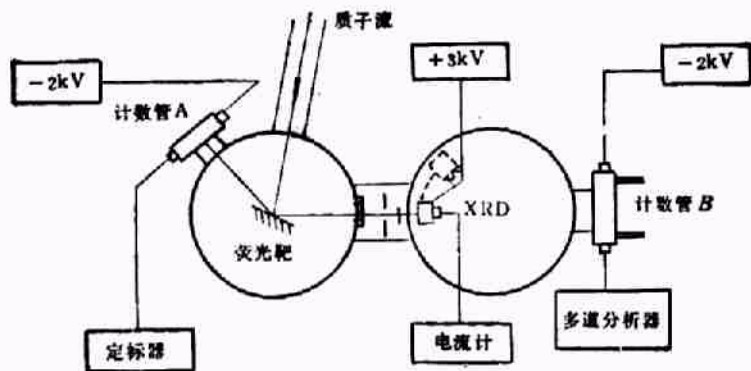


图 3 XRD 灵敏度标定装置示意图

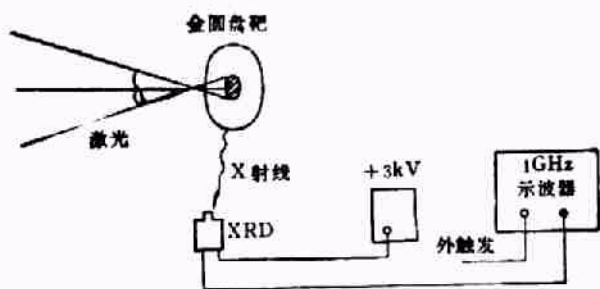


图 4 XRD 性能考核示意图

能进行了现场考核,实验装置如图 4 所示,实验结果如图 5 所示。

考核结果是:输出波形结构合理, XRD 线性输出电流 $\sim 4\text{A}$ ,整个系统(包括探测器、电缆、示波器)的响应时间 $\sim 500\text{ps}$ 。

### 三、应用

软 X 射线二极管在惯性约束聚变、X 射线激光等研究领域已得到了广泛应用,它既可以用来测量 X 射线量,也可以用来测量 X 射线能谱及辐射温度等。

#### 1. 在激光等离子体发射 X 射线量测量中的应用

金阴极 XRD 加复合膜(由  $2.95\mu\text{m}$  的 Al 膜和  $80\text{nm}$  的  $\text{C}_6\text{H}_6$  膜构成,其中 Al 膜占阴

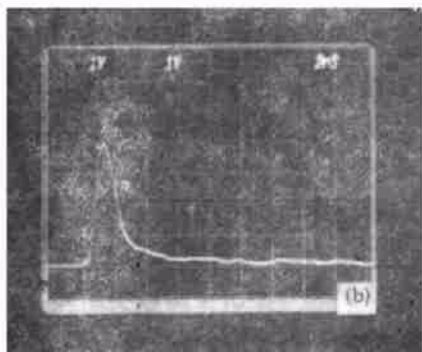
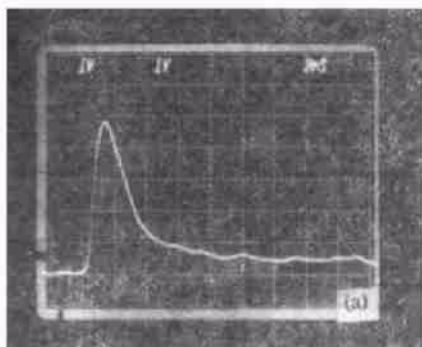


图 5 激光脉冲相近条件下同一探测器测量结果 (a) 衰减 50 倍; (b) 衰减 50 倍

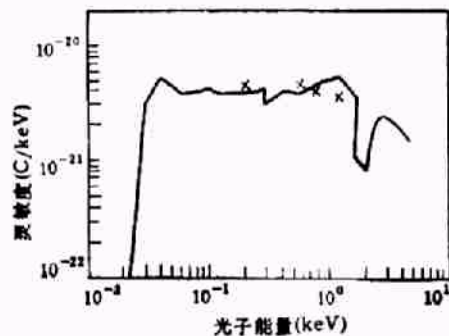


图 6 探测器的能量响应曲线 (— 理论值<sup>[1]</sup>; × 标定值)

板面积 80%， $C_6H_6$  膜占阴极面积 20%），使整个探头在 30eV ~ 1.5keV 范围内呈现平响应。这种探测器的响应曲线如图 6 所示。该探测器已多次用于激光等离子体发射 X 射线量测量。

## 2. 在激光等离子体发射 X 射线能谱及辐射温度测量中的应用

利用不同材料、不同厚度的滤片（如 Al, B, C 等）配合不同阴极（如 Ni, Cr, Al 等）组成 XRD 阵列，采用 L 边或 K 边滤波法对软 X 射线能谱（0.1~1.5keV）进行切割测量，通过回推

解谱法可求得 X 射线能谱和 X 射线源辐射温度。

致谢：本工作得到了唐道源、郑志坚、祁兰英、孙可煦等同志的关心和指导，中国科学院高能物理研究所刘平生同志制备了  $C_6H_6$  膜，在此一并表示感谢。

- [1] W. E. Spin and F. Wonton, *IEEE*, **51**(1963),1119.
- [2] A. Г. 别尔可夫斯基著，徐正卜译，真空光电器件，原子能出版社，(1980),69.
- [3] H. N. Kornblum and V.W. Slivinsky, *Rev. Sci. Instrum.*, **49**-8(1978), 1204.

## 铁电薄膜物理学与集成铁电学专题研讨会在南京大学举行

铁电体是一类具有自发电极化且其极化矢量在外电场作用下反转的电介质，它具有压电、热释电、电光、声光、光折变、非线性光学效应和高介电系数等特性，早就引起材料科学及物理学界的重视。近年来，由于制膜技术和微电子集成技术的长足发展，铁电薄膜的制备研究和应用越来越引起人们的重视。一门新的学科——集成铁电学已经形成，其核心是将铁电薄膜材料与半导体集成技术相结合，利用新的原理与新的效应创造新型微电子和光电子器件。

进入 90 年代以来，铁电薄膜的物理学与集成铁电学已成为国际上凝聚态物理学与光电功能材料与器件研究方面的一大热点。集成铁电学的一些应用已经实现，一批高技术产品已逐渐商品化，并具有很强的国防应用背景。

集成铁电学的发展提出了一系列急待解决的物理问题，这些问题的解决将大大推动这一新兴学科的发展。我国在铁电薄膜物理学与集成铁电学领域的研究工作已有一定基础，但与国际先进水平相比尚有较大差距。加强我国在这一领域的基础性研究，发挥群体优势，为我国集成铁电学的发展和集成铁电器件产业的建立奠定基础，并在研究中逐步形成中国特色已是当务之急。

凝聚态物理及相关学科国家重点实验室网络系统是本领域国家重点实验室(或部门开放实验室)自愿组成的从事学术研究的联合体。自 1990 年成立以来，逐步扩大，现已包括南京大学固体微结构物理实验室等八个国家重点实验室(中国科学院上海冶金研究所信息功能材料国家实验室于今年加入网络系统)。在铁电薄膜物理学、集成铁电学、半导体物理学、半导体集成器件及红外物理学方面各有自己的优势和专长，有一支由著名科学家群体带头、学术思想先进、学术梯队完整、学科交叉、整体优势明显的学术队伍，拥有一大批国际、国内先进的薄膜生长、表征设备，有良好的发

展器件的条件，各实验室之间合作交流已有多，具有明显的整体优势。

为了进一步发挥网络系统的优势，在铁电薄膜物理学和集成铁电学研究方面走出一条国家实验室攻关的新路子，由南京大学固体实验室主任闵乃本院士倡议和组织，网络系统于 1994 年 3 月 21 日至 23 日在南京大学召开了铁电薄膜物理学与集成铁电学专题研讨会。网络系统所属八个国家重点实验室的 30 余位研究人员参加了研讨会，各实验室均有主任或副主任出席。会议组织了学术报告，闵乃本院士、林彰达、沈学础、林承鲁研究员，王民、刘治国教授等分别就铁电薄膜物理学与集成铁电学发展、国内外研究概况、研究热点、应用及发展战略等问题作了近 20 个学术报告，在宽松、自由的学术气氛下，进行了广泛深入的学术讨论。会议就国内外目前铁电薄膜物理学与集成铁电学发展状况及我国在该领域的发展战略组织了专题讨论，各单位还介绍了本单位所具有的研究条件及工作基础，提出在该领域中可以承担的研究任务以及相互协作共同研究的工作和课题。

在专题研讨会上，形成了共同发展铁电薄膜物理学与集成铁电学的学术思想和发展战略。在此基础上，网络系统认为，作为基础、应用基础研究领域的一支国家队，必须认真执行“开放、联合、流动”的原则，努力争取承担国家重大课题，取得高水平的成果。为此，在闵乃本院士的主持下，网络系统拟向国家有关部门提出国家重点研究计划立项建议书。这项由八个国家重点实验室联合提出的题为“铁电薄膜物理学与集成铁电学中若干重要问题的研究”的建议书说明了该项目提出的学术背景，介绍了国内外在这方面的发展及应用状况，提出了包括铁电薄膜物理学基本问题研究，采用先进技术制备铁电薄膜及铁电薄膜的集成与应用等方

(下转第 547 页)