

# X 射线二极管时间特性研究\*

孙可煦 江少恩 易荣清 崔延莉 丁永坤 刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体国家重点实验室, 四川绵阳 621900)

(2005 年 2 月 4 日收到, 2005 年 5 月 16 日收到修改稿)

研究 X 射线二极管(XRD)时间特性. XRD 是构成软 X 射线能谱仪的主要部件, 它用于激光等离子体发射软 X 射线谱测量. 实验利用激光聚变研究中心的 200TW 激光器(激光能量 ~ 6J, 脉冲宽度 ~ 30fs)打金箔靶产生的 X 射线发射谱, 用滤片(Al)-XRD 探测系统测量, 探测信号由高频电缆(SUJ-50-10)传输和宽带示波器(TDS694C 和 TDS6604B)记录. 实验数据进行了线性拟合和比对分析.

关键词: X 射线二极管, 时间特性, 软 X 射线能谱仪, 数据处理

PACC: 0600, 0630F, 2970, 0260

## 1. 引言

激光等离子体实验研究中, 等离子体发射软 X 射线时, 空、谱测量极其重要<sup>[1,2]</sup>. 除了能谱绝对强度测量十分重要外, 能谱发射的时间过程测量也十分重要<sup>[3,4]</sup>. 随着激光装置的不断升级, 多路激光辐照不同类型靶可产生高强度 X 射线辐射源, 为深入开展多种应用研究实验提供了必要条件. 诸如激光-等离子体相互作用基础研究: 平面靶及腔靶中激光吸收、X 射线转换<sup>[5]</sup>及 X 射线辐射能量再分配<sup>[6]</sup>等过程的物理机理<sup>[7]</sup>, 以及 X 射线辐射谱的非平衡特性研究等等. 再如激光惯性约束聚变(ICF)实验研究中, 利用激光-腔靶产生的高强度 X 射线辐射源, 能够深入开展辐射输运<sup>[8]</sup>、辐射烧蚀及辐射不透明度等一系列应用研究等等. 所有这些研究都需要对 X 射线发射光谱进行能量分辨、时间分辨及空间分布的细致测量研究.

目前, 由滤片-X 射线二极管(XRD)阵列构成的软 X 射线能谱仪<sup>[9]</sup>仍具有不可替代的作用. 因此, 对 XRD 探测系统的时间特性研究是我们近期工作的重要内容.

## 2. 实验条件

实验利用中物院激光聚变研究中心的 200TW

激光(激光能量 ~ 6J, 脉冲宽度 ~ 30fs)打金箔(厚度 20 $\mu$ m)靶产生 X 射线发射, 检测探测器为软 X 射线二极管(XRD). 信号传输电缆为 SUJ-50 高频电缆, 记录示波器 TDS694C 和 TDS6604B. 靶室真空度 ~ 2  $\times 10^{-3}$  Pa. 实验装置示意图见图 1. 实验中, XRD 偏压 1000—3000V, SUJ-50 高频传输电缆的长度为 1—30m.

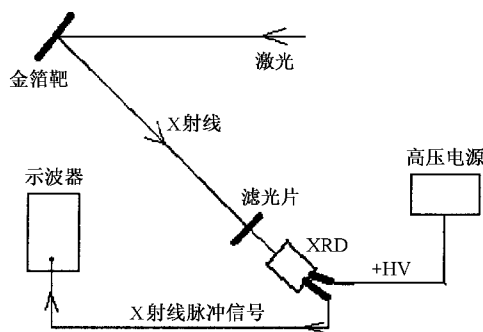


图 1 实验装置示意图

## 3. 实验

本轮实验可以说是在 2003 年上海激光联合实验室的 20TW 上实验的继续和补充, 当然实验也进行了部分的改进, 例如很多实验点进行了反复实验, 以便减少实验数据的统计误差. 2003 年实验记录使用的记录设备有 TDS684C, TDS694C 和 WM8500 三种示波器, TDS684C 示波器的带宽为 1000MHz,

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-804-3)资助的课题.

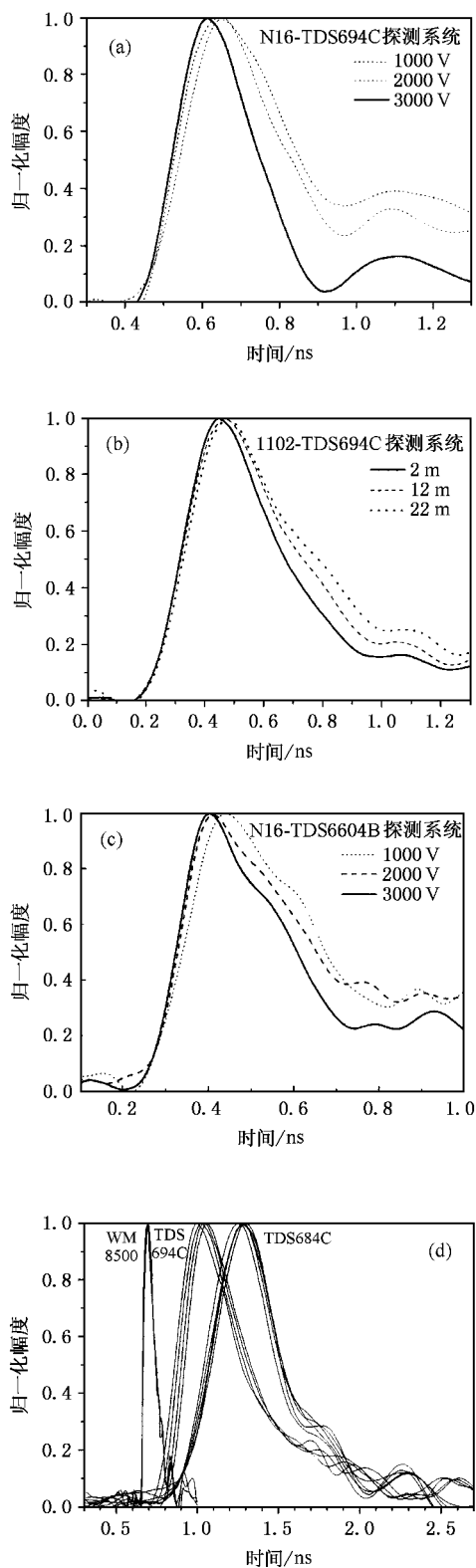


图2 典型脉冲波形 (a)滤片(Al)-XRD(N16)-电缆(1m)-TDS694C 探测系统脉冲波形随偏压变化 (b)滤片(Al)-XRD(N16)+3000V)-TDS694C 探测系统脉冲波形随电缆长度变化 (c)滤片(Al)-XRD(N16)-电缆(2m)-TDS6604B 探测系统脉冲波形随偏压变化 (d)三种不同示波器记录滤片-XRD 探测系统的脉冲波形

TDS694C 示波器的带宽为 3000MHz, WM8500 示波器的带宽为 5000MHz. 2004 年实验使用的记录设备有 TDS694C 和 TDS6604B 两种示波器, TDS6604B 示波器的带宽为 6000MHz. 测量脉冲波形参见图 2; 图 2(d) 还给出了 2003 年实验不同示波器记录典型脉冲波形.

## 4. 数据处理与分析

### 4.1. 处理方法

由于示波器的采样点有限, 探测系统的脉冲响应时间内仅能采样  $N-N+1$  次, 对慢信号而言, 响应时间长,  $N$  值较大, 响应时间的测量值偏离实际值相对较小. 而对快信号而言, 特别是当探测系统的响应时间接近示波器的采样时间时,  $N$  值较小, 甚至接近于 2—3, 则响应时间的测量值偏离实际值相对较大. 由于示波器采样点间采取了插值, 这种偏差符合统计分布, 只要每个实验点采取反复实验, 数据取平均值, 即可减少统计误差.

探测系统上升沿响应时间读取方法, 从记录脉冲信号前沿峰值高度的 10% 处计算到峰值高度 90% 处止, 为探测系统上升沿响应时间. 从脉冲信号上升沿峰值高度的 50% 处起计算到信号下降沿峰值高度的 50% 处止, 为探测系统半宽度响应时间.

### 4.2. XRD 渡越时间估算

根据实验测量结果及 4.1 节的数据读取方法, 读出不同组合探测系统测量脉冲波形的前沿和半宽度, 即给出不同组合探测系统响应时间. 图 3 给出两组探测系统响应时间, 图 3(a) 为滤片(Al)-XRD(N16)-SUJ-50 电缆(1m)-TDS694C 示波器探测系统响应时间随 XRD 偏压变化曲线, 当 XRD 偏压在 1000—3000V 之间变化时, 此探测系统上升沿响应时间在 110—145ps, 半宽度响应时间 220—330ps. 图 3(b) 为滤片(Al)-XRD(N16)-电缆(2m)-TDS6604B 探测系统响应时间, 当 XRD 偏压在 1000—3000V 之间变化时, 探测系统前沿响应时间在 105—130ps, 半宽度响应时间 270—370ps. 由此可见 XRD 探测系统响应时间随 XRD 偏压升高而下降.

现在我们对 XRD 的上升沿响应时间做估算. 根据 XRD 工作原理, 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

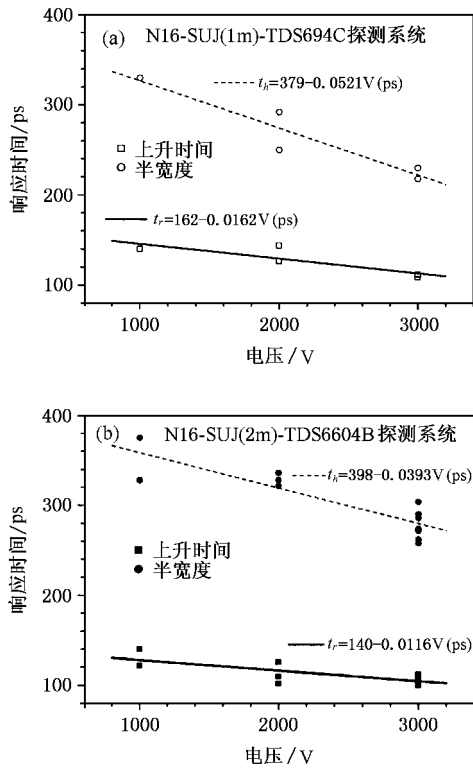


图3 响应时间与 XRD 偏压关系 (a) 滤片(AI)-XRD(N16)-1m 电缆-TDS694C 探测系统响应时间随 XRD 偏压变化;(b) 滤片(AI)-XRD(N16)-2m 电缆-TDS6604B 探测系统响应时间随 XRD 偏压变化

极运动,电子从阴极到阳极的运动时间称之为渡越时间( $\tau_x$ ),根据电学原理光电子在电场中受力为

$$F = QE, \quad (1)$$

式中  $Q$  为光电子电荷量,  $E$  为电场强度 ( $E = V/h$ ,  $V$  为偏压,  $h$  为阴阳极间距),  $F$  为光电子在电场中受力.再根据力学原理有

$$F = m_e a \quad (2)$$

和

$$U_t = U_0 + at, \quad (3)$$

这里  $m_e$  为电子质量,  $a$  为电子在强电场作用下产生的加速度,  $U_t$  为电子运动瞬时速度,  $U_0$  为电子运动初速度,  $t$  为电子运动时间.初始时刻,电子动能很小,运动无规则,因此,电子初速度可以忽略,从而有

$$U_t = at. \quad (4)$$

电子在强电场作用下,获得电动势为

$$W_e = Q\Delta E, \quad (5)$$

$W_e$  为电动势,电动势做功使电子获得动能

$$W_k = m_e U_t^2/2. \quad (6)$$

由电动势做功全部变成电子动能得到

$$t^2 = 2h^2 m_e / eV \quad (7)$$

这里全部采用 MKS 制,光电子到达阳极的时间为

$$\tau_x = 3.375 \times 10^{-6} hV^{-0.5} (s). \quad (8)$$

由此可见 XRD 光电子渡越时间与 XRD 偏压的平方成反比(参见图 4(a))与 XRD 阴阳极间距成线性关系(参见图 4(b)).

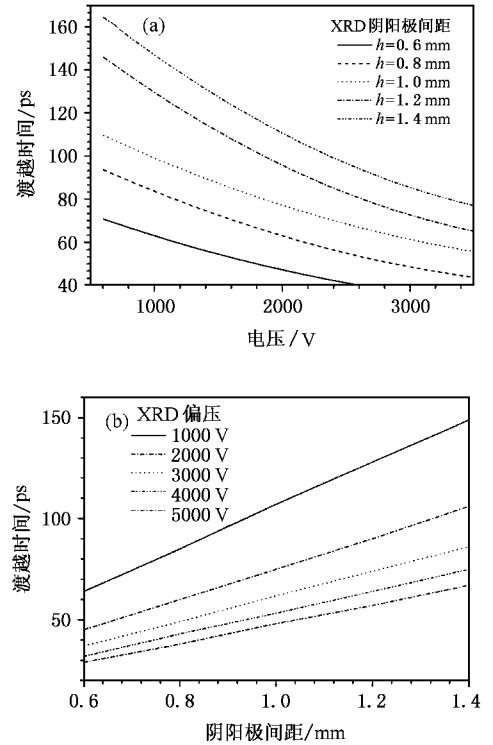


图4 XRD 渡越时间估算 (a) XRD 渡越时间随偏压变化 (b) XRD 渡越时间随 XRD 阴阳极间距变化

### 4.3. XRD 自身上升沿响应时间

根据上升沿响应时间  $t_x$  的定义,从脉冲前沿的 10% 峰值时间处计算到 90% 峰值时刻为脉冲前沿响应时间.当 XRD 受到 X 射线光子辐照时,首先我们不考虑光子的到达时间的先后,而把光子到达光阴极的时刻定义为光电子渡越时间的初始时刻,光电子渡越时间为光电子到达阳极的最终时刻,此时阳极电压下降最大,从而在阴极输出电压也达到峰值,因此,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  $t_x \approx 0.8\tau_x$  (参见图 5).

### 4.4. XRD-示波器系统响应时间

XRD 探测系统上升沿响应时间除与 XRD 偏压有关外,还和电缆、示波器等有关,图 6 两组实验所

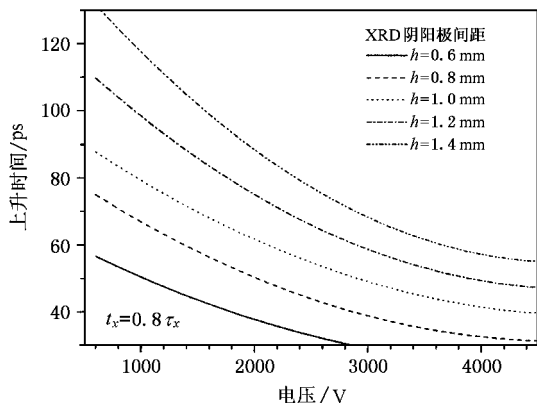


图 5 XRD 上升沿响应时间估算

用电缆较短,对 XRD 探测系统上升沿响应时间影响较小,可忽略.这里我们首先讨论它们的前沿响应时间,在忽略电缆影响的条件下,XRD 探测系统上升沿响应时间可以用下式表示:

$$t_r = (t_x^2 + t_0^2)^{0.5}, \quad (9)$$

式中  $t_x$  为 XRD 上升沿响应时间,  $t_0$  为示波器响应时间.由于 XRD(N16)-TDS6604B 探测系统实验数据比较充分,这里我们以 N16-TDS6604B 探测系统为主进行了计算.根据电子学经验公式,示波器带宽与其上升沿响应时间有如下关系式:  $F \approx 0.35/t_r$ , TDS6604B 示波器带宽为 6000MHz,其  $t_0 \approx 60ps$ .因此(9)式可看成常数与一个指数函数的递加,参见图 6(a).图 6(a)中还同时给出了 N16-TDS6604B 探测系统上升沿响应时间实验值,由图可见,N16-TDS6604B 探测系统上升沿响应时间实验值处在计算曲线的上方,即实验值大于计算值,计算中还欠缺考虑脉冲信号自身的时间过程,如果脉冲信号上升时间为  $t_s$  则有

$$t_r = (t_x^2 + t_0^2 + t_s^2)^{0.5}. \quad (10)$$

根据 N16-TDS6604B 短电缆探测系统实验结果,当 N16 偏压为 3000V 时,系统上升时间平均为 105.5ps.若 XRD 阴阳极间距取  $h = 1.2mm$ ,则  $t_x \approx 59.2ps$ ,从而  $t_s \approx 63.5ps$ .将此值代入(10)式计算,计算结果与实验值比较符合,参看图 6(b).

#### 4.5.SUJ-50 电缆响应时间估算

为了计算 SUJ-50 电缆对 XRD 探测系统响应时间的影响,我们首先根据电缆手册查出 SUJ-50 电缆的衰减系数(参见表 1),再通过表 1 中的查询数据,进行指数拟合,获得 SUJ-50 电缆衰减系数的数学表

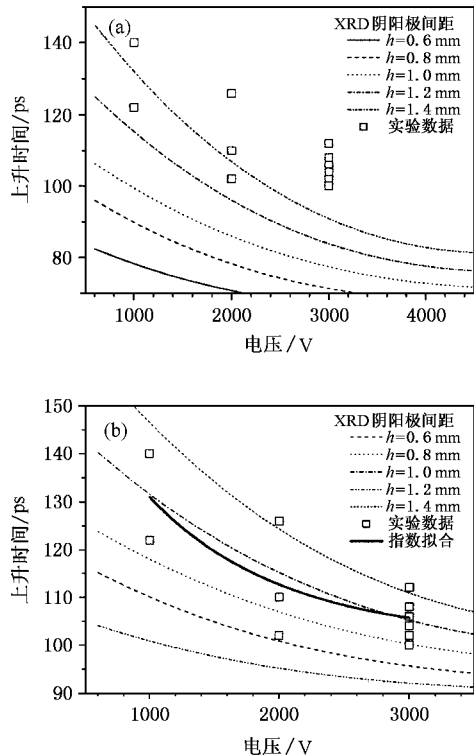


图 6 XRD-TDS6604B 探测系统响应时间估算 (a)不考虑脉冲信号自身时间过程系统响应时间计算值与实验值 (b)考虑脉冲信号自身时间过程系统响应时间计算值与实验值

达式如下:

$$\alpha = 0.005349 F^{0.5383} \text{ (dB/m)}, \quad (11)$$

式中  $F$  为信号频率(MHz),根据(11)式可以计算出 SUJ-50 电缆对不同频率信号的衰减系数,参见图 7(a).

表 1 电缆频率衰减

信号频率/MHz	30	200	1000	3000	6000
手册衰减系数(dB/m)	0.036	0.082	0.21	0.41	0.59
拟合计算值(dB/m)	0.0334	0.0927	0.220	0.398	0.578

根据文献 [10] 的电缆响应时间常数表达式为

$$\tau = (0.115 L \alpha^2) / 4\pi F \text{ (s)}, \quad (12)$$

其中  $\tau$  是电缆响应时间常数(s),  $L$  是电缆长度(km),  $\alpha$  是电缆衰减系数(dB/km),  $F$  是信号频率(Hz).根据(12)式,可以计算可给出不同频率信号下的电缆响应时间常数随电缆长度变化曲线(参见图 7(b)).

#### 4.6.XRD 探测系统响应时间与电缆长度关系

图 8 给出两组探测系统响应时间随电缆长度变化的曲线.图 8(a)为滤片(Al)-XRD(N16)-TDS694C

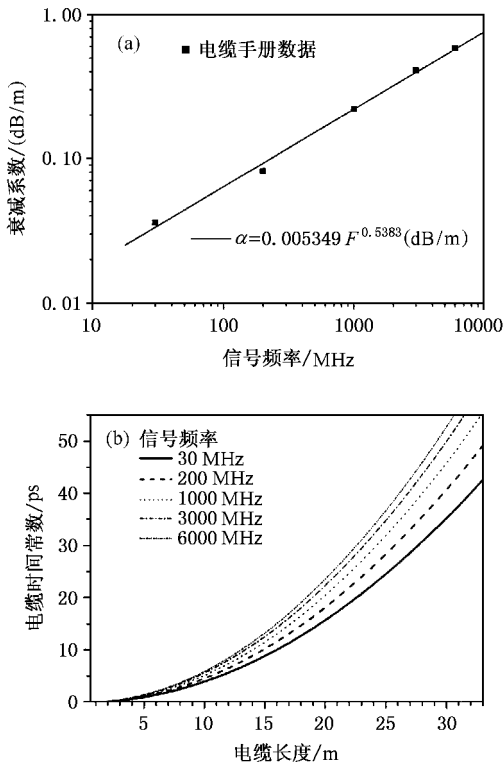


图7 SUJ-50 电缆特性估算 (a) 电缆衰减系数随信号频率变化 (b) 电缆响应时间常数随电缆长度变化

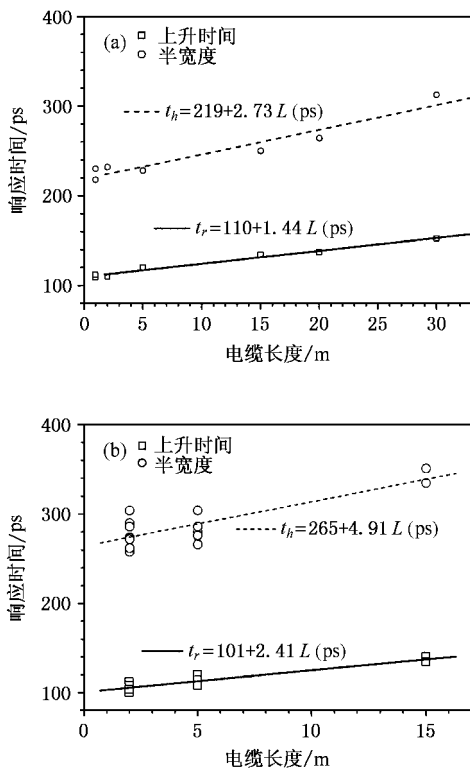


图8 XRD-示波器探测系统响应时间随电缆长度变化 (a) 滤片(Al)-XRD(N16)-TDS694C 探测系统响应时间随电缆长度变化曲线 (b) 滤片(Al)-XRD(N16)-TDS6604B 探测系统响应时间随电缆长度变化曲线

探测系统响应时间随电缆长度变化曲线,由图可见系统响应时间随电缆长度增加而升高.当电缆长度在1—30m之间变化时,探测系统前沿响应时间为110—155ps,半宽度响应时间为220—310ps.图8(b)为滤片(Al)-XRD(N16)-TDS6604B 探测系统响应时间随电缆长度变化曲线,系统响应时间同样随电缆长度增加而升高.当电缆长度在1—15m之间变化时,探测系统前沿响应时间为105—135ps,半宽度响应时间为270—340ps.这两组实验 XRD 偏压均加到3000V.

我们仍以 N16-TDS6604B 探测系统实验数据为基础,根据前面计算,当 N16 偏压为 3000V, XRD 阴阳极间距取  $h = 1.2\text{mm}$  时,  $t_x \approx 59.2\text{ps}$ ,  $t_s \approx 63.5\text{ps}$ , 再根据电子学经验公式有  $F \approx 0.35/t_r$ , 则被测信号频率近似为 5512MHz, 把这个数据代入(11)式计算得到 SUJ-50 电缆衰减系数  $\alpha = 0.552\text{dB/m}$  或 552 dB/km, 再把这些数据代入(12)式可给出电缆响应时间常数随电缆长度变化关系式

$$\tau = 0.0582 L^2 (\text{ps}), \quad (13)$$

式中  $L$  是电缆长度,以 m 为单位.在 4.2 节只考虑短电缆情况下的系统响应时间,电缆响应时间可以忽略,本节考虑长电缆情况下的系统响应时间,必须考虑电缆响应时间的影响,因此(10)式变为

$$t_r = (t_x^2 + t_0^2 + t_s^2 + \tau^2)^{0.5} (\text{ps}). \quad (14)$$

当 N16 偏压为 3000V 时,  $t_x = 59.3\text{ps}$ ,  $h$  以 mm 为单位;  $t_0 = 60\text{ps}$ ;  $t_s = 63.5\text{ps}$ ;  $\tau = 0.0582 L^2 \text{ps}$ ,  $L$  以 m 为单位,代入(14)式有

$$t_r = (7632 + 3516.5h^2 + 3.387 \times 10^{-3} L^4)^{0.5}. \quad (15)$$

根据(15)式计算结果参看图9,图中同时给出了实验数据,由图可见,当电缆较短时,计算值接近实验值,当电缆较长时,计算值小于实验值,并且趋势是随电缆长度增加逐渐偏离更大,这说明,计算应更多地依赖电缆长度,或者说,电缆的实际响应时间比(12)式计算值要大.

图10(a)和(b)给出两组不同 XRD-TDS694C 示波器探测系统响应时间随 XRD 偏压变化的曲线(由于两组实验的次数所限,统计误差较大,但数据总的趋势还是能够说明问题的).图10(a)中数据取自2003年实验<sup>[11]</sup>, XRD 为 1102#, 电缆长度为 22m, 图10(b)中数据取自2004年实验, XRD 为 N16#, 电缆长度为 20m, 两组实验所用电缆同为 20m 以上长电缆,这儿暂时不考虑电缆长度差的影响.

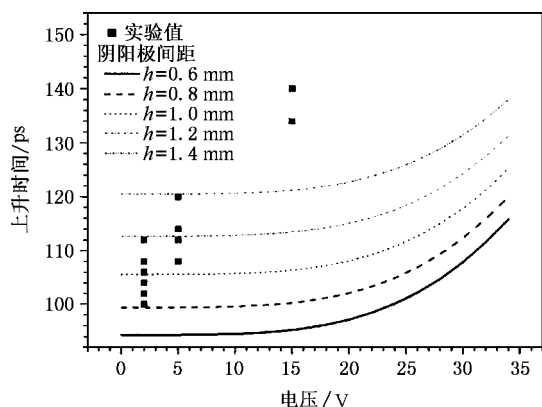


图 9 XRD-TDS6604B 探测系统前沿响应时间估算及实验值

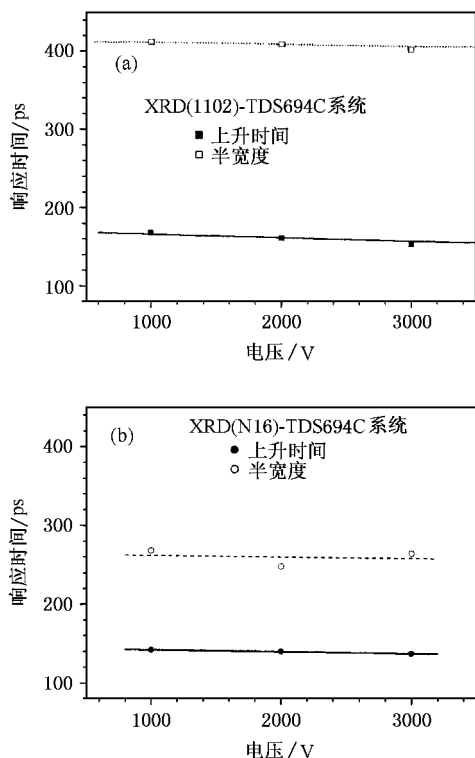


图 10 响应时间与 XRD 关系 (a) 滤片(Al)-XRD(1102)-22m 电缆-TDS694C 探测系统响应时间 (b) 滤片(Al)-XRD(N16)-20m 电缆-TDS694C 探测系统响应时间

从图 10 可见,当 XRD 偏压在 1000—3000V 之间变化时,由 XRD(1102)组成的探测系统前沿响应时间在 155—165ps 之间变化,由 XRD(N16)组成的探测系统前沿响应时间在 135—145ps 之间变化,两组 XRD-TDS694C 探测系统前沿响应时间差仅 20ps 左右,差别不大,很容易用 XRD 阴阳极间距差造成电场强度差,从而造成两组 XRD 的渡越时间差来解释.两组探测系统测量数据半宽度响应时间差别却

很大,当 XRD 偏压在 1000—3000V 之间变化时,由 XRD(1102)组成的探测系统半宽度响应时间在 405—415 ps 之间变化,而 XRD(N16)组成的探测系统半宽度响应时间在 255—260ps 之间变化,这两组 XRD-TDS694C 探测系统所测半宽度响应时间相差近 150ps.这又如何解释呢?

首先我们从 XRD 的工作原理出发来考虑,当 XRD 阴极受到辐射辐照时,所产生光电子在强电场驱使下加速,很快被阳极搜集,从而在阴极上形成峰值信号  $V_p$ ,此后 XRD 通过其 RC 电路放电,其放电过程由下式表示:

$$V_t = V_p \exp(-(t - t_r)/T), \quad (16)$$

式中  $V_p$  为峰值电压,  $t_r$  为探测系统上升时间,  $T$  为放电常数,  $T = RC$ ,  $R$  为系统负载电阻,  $C$  为阴阳极极间电容. XRD 信号上升到峰值后,系统开始放电,输出信号电压开始下降,当信号电压下降到峰值电压的一半时,即  $V_t/V_p = 1/2$ ,此时刻时间定为  $t_f$ ,从而有

$$t_f = 0.693T + t_r \quad (17)$$

$$t_h = t_f - 0.5t_r \\ = 0.693RC + 0.5t_r, \quad (18)$$

式中  $t_r$  为探测系统上升时间,  $t_f$  为峰值电压下降到一半的时间,  $t_h$  为系统半宽度响应时间,  $R$  为系统负载电阻,  $C$  为 XRD 极间电容. 根据经典物理平板电容公式

$$C = \epsilon_0 S/h, \quad (19)$$

式中  $S$  ( $\text{cm}^2$ ) 为平板电容的平板面积,  $h$  ( $\text{cm}$ ) 为平板间距,  $\epsilon_0$  为电容平板间介质的介电常数,在真空中,  $\epsilon_0 = 1$ . 这里平板面积为 XRD 阴阳极面积,平板间距为 XRD 阴阳极的间距. XRD 阴极面直径为 1cm,阴阳极间距近似为 0.1cm,在 CGS 制中  $0.9\text{cm} = 1\text{pF}$ ,从而(19)式变为

$$C = 1.11 S/h (\text{pF}). \quad (20)$$

为了便于光电子到达阴极, XRD 阳极取成网状,孔占比约为 80%. 因此(19)式计算时,考虑到面积的有效性,即电容的有效面积小于  $S$ ,电容计算结果参见图 11(a). 将(17)和(20)式代入(18)式得

$$t_h = 78.3 + 38.5S/h - 22.1 e^{-0.0434L} (\text{ps}). \quad (21)$$

$R$  取  $50\Omega$ ,当  $L = 0$  时, XRD-TDS694C 探测系统半宽度响应时间  $t_h = 56.2 + 38.5 S/h$  计算结果参见图 11(b).

从图 11(b)可见,不同 XRD 由于阴阳极间距差

(由加工和安装造成)较大,不同 XRD-TDS694C 探测系统之间半宽度响应时间差别较大是可能的,但要差到倍数却是不大可能的.因此我们认为,XRD 探测系统放电常数的电容除有 XRD 的阴阳极极间电容贡献外,还有示波器的寄生电容贡献.图 3 两组实验数据更能说明这个问题,图 3(a)数据由 N16-TDS694C 探测系统获得,图 3(b)数据由 N16-TDS6604B 探测系统获得,TDS6604B 的带宽远大于 TDS694C,N16-TDS6604B 系统的前沿响应时间比 N16-TDS694C 快,而 N16-TDS6604B 系统的半宽度响应时间却比 N16-TDS694C 慢得多,这进一步说明 XRD-示波器系统的半宽度响应时间不完全取决于 XRD 的阴阳极间电容,而是与示波器的寄生电容有关.进一步的定量分析有待进一步的实验.

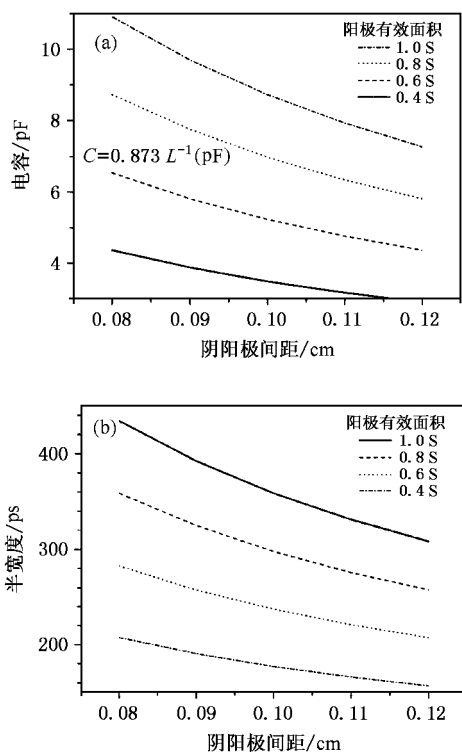


图 11 XRD-TDS694C 探测系统半宽度响应时间估算 (a)XRD 极间电容估算 (b)探测系统半宽度响应时间估算

## 5. 结 论

高频信号的测量过程中,滤片-XRD-电缆-示波器探测系统的前沿响应时间与 XRD 的渡越时间、电缆的频率特性及示波器的固有带宽有关.XRD 的渡越时间不仅与 XRD 所加偏压密切相关,也与 XRD 的结构(即 XRD 的阴阳极间距)有关,且与所加偏压

的平方成反比,与阴阳极间距成线性关系.探测系统前沿响应时间随偏压升高而加快,尤其当我们所用高频电缆不太长,示波器又具有高带宽时,由于示波器自身响应时间接近 XRD 的响应时间,这种关系便更明显地表现出来.SUJ-50 电缆的响应时间与传输信号的频率及传输电缆的长度相关,主要与电缆长度密切相关,且与电缆长度的平方成正比,当电缆不太长时,电缆响应时间还小于其他因素的影响,电缆不占主导地位.当电缆相当长时,电缆响应时间可能远大于其他因素的影响,电缆占主导地位,此时电缆响应时间将决定探测系统的响应时间.因此,在高频信号传输过程中,即使采用了高频电缆,电缆长度也不宜过长.

XRD-电缆-示波器探测系统的半宽度响应时间主要取决于探测系统的放电回路,放电时间的快慢取决于放电回路的  $RC$  时间常数, $R$  是  $50\Omega$  负载电阻为常数,实际放电快慢取决于回路中的电容  $C$ ,本文 3.5 节只讨论了 XRD 阴阳极间电容的影响,XRD 阴阳极间电容  $C = 1.11S/h$  (pF),其中  $S$  为阴阳极的面积,可以认为是常数,也就是说电容主要取决于 XRD 阴阳极的极间距,根据机械加工精度,考虑到安装误差,两个 XRD 阴阳极间距相对差 30% 时,就可能造成半宽度差约 115ps.因此,不同 XRD 由于阴阳极间电容差造成较大的半宽度响应时间差是可能的,但 XRD 阴阳极间电容决不是影响系统半宽度响应时间的唯一因素,示波器的寄生电容也是影响系统半宽度响应时间的一个因素,定量分析有待进一步的实验研究.

XRD 阴阳极的极间距  $h$  对 XRD 探测系统来说,是一个非常重要的参数,对系统前沿而言,XRD 渡越时间  $\tau_x = 3.375 \times 10^{-6} hV^{-0.5}$  影响系统前沿, $\tau_x$  正比于  $h$ , $h$  值每增大 10%,渡越时间也增大约 10%.随着  $h$  值增大,当渡越时间超过其他影响因素时,则渡越时间对系统前沿起决定作用,因此,XRD 阴阳极间距不宜过大.对系统半宽度而言, $t_h = 56.2 + 38.5 S/h$ , $t_h$  反比于  $h$  值, $h$  值每增大 10%,系统半宽度下降约 10%.就此而言, $h$  值越大越好.由此可见,XRD 阴阳极间距是一对矛盾的统一体,既不能太大,也不能太小,设计时必须兼顾.

当我们作辐射时间过程研究时,尤其是作快信号测量时,选择合理的探测器是十分必要的,例如 XRD,应适当提高探测器的偏压,缩短传输电缆,选择宽频带高采样率示波器,以便提高系统的时间响

应特性,减少信号的失真程度.对我们的探测系统时间特性研究而言,快响应系统响应时间测量受示波器采样速率所限,采样时间与响应时间同量级,因此在响应时间内,采样点并不足够多,虽然在采样点间进行了插值,但这仍然存在一个统计误差问题.本轮实验我们虽然认识到这个问题,部分实验点采

取了反复实验,但总的说仍然很不够,有待进一步实验解决.

实验得到激光聚变研究中心 200TW 激光器运行组的工作人员的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢.

- [ 1 ] Chang T Q , He X T , Yu M 1989 *High Power Laser and Particle Beams* **1** 193 ( in Chinese ) [ 常铁强、贺贤土、于敏 1989 强激光与粒子束 **1** 193 ]
- [ 2 ] Zhang J , Pei W B , Sui C Z *et al* 1991 *Acta Phys. Sin.* **40** 424 ( in Chinese ) [ 张钧、裴文兵、隋成之等 1991 物理学报 **40** 424 ]
- [ 3 ] Sun K X , Yi R Q , Ma H L *et al* 1994 *Acta Opt. Sin.* **14** 561 ( in Chinese ) [ 孙可煦、易荣清、马洪亮等 1994 光学学报 **14** 561 ]
- [ 4 ] Yi R Q , Miao W Y , Sun K X *et al* 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 443 ( in Chinese ) [ 易荣清、缪文勇、孙可煦等 1996 物理学报 **45** 443 ]
- [ 5 ] Huang T X , Sun K X , Yi R Q *et al* 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1688 ( in Chinese ) [ 黄天暄、孙可煦、易荣清等 1996 物理学报 **45** 1688 ]
- [ 6 ] Huang T X , Sun K X , Zheng Z J *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 40 ( in Chinese ) [ 黄天暄、孙可煦、郑志坚等 1996 物理学报 **47** 40 ]
- [ 7 ] Sun K X , Cheng J X , Wang H B *et al* 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 748 ( in Chinese ) [ 孙可煦、成金秀、王红兵等 1994 物理学报 **43** 748 ]
- [ 8 ] Jiang S E , Zheng Z J , Sun K X *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 730 ( in Chinese ) [ 江少恩、郑志坚、孙可煦等 2001 物理学报 **50** 730 ]
- [ 9 ] Sun K X , Yang J G , Zheng Z J 1990 *High Power Laser and Particle Beams* **2** 16 ( in Chinese ) [ 孙可煦、杨建国、郑志坚 1990 强激光与粒子束 **2** 16 ]
- [ 10 ] Liu Q Z , Zhao Y W , Chen G Y *et al* 1994 *Science publishing company* ( Beijing Science Press ) p232 ( in Chinese ) [ 刘庆兆、赵毓武、陈冠宇等 1994 脉冲辐射场诊断技术(北京:科学出版社)第 232 页 ]
- [ 11 ] Sun K X , Jiang S E , Yi R Q *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1558 ( in Chinese ) [ 孙可煦、江少恩、易荣清等 2004 强激光与粒子束 **16** 1558 ]

## Research on time characteristics of soft X-ray diode<sup>\*</sup>

Sun Ke-Xu Jiang Shao-En Yi Rong-Qing Cui Yan-Li Ding Yong-Kun Liu Shen-Ye

( National Key Laboratory of Laser Fusion , Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )

( Received 4 February 2005 ; revised manuscript received 16 May 2005 )

### Abstract

In this paper the time characteristics of soft X-ray diode ( XRD ) is studied. XRD is the importance component of soft X-ray spectrometer which measures the soft X-ray spectrum emitted by laser-plasma. The experiment utilizes the 200TW laser facility with energy  $\sim 6\text{J}$  and pulse width  $\sim 30\text{fs}$  at the Laser Fusion Research Center of CAEP. The Au foil target irradiated by laser pulse produced X-ray emission , the filter( Al )-XRD system measures the X-ray signal. The high frequency cable ( SUJ-50 ) transmits the electrical signal , a broad band oscillograph ( TDS694C and TDS6604B ) registers the signal. Linearity fit and comparison analysis of experimental data are performed.

**Keywords :** X-ray diode , time characteristic , soft X-ray spectrometer , data processing

**PACC :** 0600 , 0630F , 2970 , 0260

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China( Grant No. 863-804-3 ).