

快放电激励准分子激光器的 过压击穿及其测量装置

夏康民 傅淑芬 陈建文

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文报道了采用电阻分压器测量准分子激光器放电电压的实验结果。讨论了影响测量装置性能的各种因素和消除办法,并研究了器件的过压击穿形式及其变化规律。

Over-voltage breakdown and measurement equipment for the excimer laser using fast discharge excitation

Xia Kangmin, Fu Shufen, Chen Jianwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: This paper presents the experimental results on measuring the discharge voltage of an excimer laser using a voltage divider. Also discussed are various factors impairing the performance of the measurement equipment and the ways for limination of over-voltage breakdown and the variation law.

一、引言

在放电激励激光器中,击穿形式是决定器件运转水平的重要因素。研究激光器的击穿形式,首先涉及到的就是对高电压短脉冲信号的测量问题。这种测量的主要困难在于对测试系统响应时间的要求,尤其是提高系统的耐压水平与缩短响应时间常是一对矛盾的要求。本文介绍我们设计并在测量准分子激光器放电中成功使用的一种毫微秒高压测量系统。

二、毫微秒级高压测量系统

采用并联匹配形式,用OK-19型高压示波器观察记录。测量装置的核心部分是高压毫微秒级的分压器。

我们研制了一组高压毫微秒分压器,其分压比 D_p 分别约为10、30、50,耐压 $U_k \geq 60\text{ kV}$,上升时间 $t'_s \sim 0.8\text{ ns}$ 。它采用同轴高阻抗电阻式结构,可作为传输线来分析它的分布参数 C_g 与 L_g 值。一般 C_g 、 L_g 值主要

收稿日期:1984年6月15日。

通过 R 值、 D/d 值及总长 L_0 控制, 它们应该满足^[3]:

$$L_0 < \frac{t_r \cdot R}{20} \quad (1)$$

$$C_0 < \frac{t_r}{0.23R} \quad (2)$$

当 $t_r \sim 1 \text{ ns}$ 、 $R \sim 1 \text{ k}\Omega$ 时, 要求 $L_0 < 50 \text{ (nH)}$, $C_0 < 4 \text{ (pF)}$ 。可见在高阻抗分压器中, 分布电容 C_0 的影响是主要的, 它直接限制着系统响应时间。实验结果表明, 除结构参数 D/d 、 L_0 及 R 值对分布参数有影响外, C_0 、 L_0 值还受其他因素影响, 这些因素常常起着“补偿”分布参数的作用。

其中比较重要的有: (1) 同轴式分压器对同轴性要求较高, 非同轴性将引进附加分布参数, 使脉冲信号畸变。所以应提高分压器的刚性及信号输入输出端的定位精度, 我们采用使低压臂的接地柱与定位杆合并, 将高压臂、低压臂及输入输出端的连接方式作成拉伸可调。(2) 分压器输入端会产生因特性阻抗突变和截面尺寸突变引入的误差。前者可使 D/d 值尽量接近 D'/d' 值 (d' 、 D' 分别为原传输线内、外导体直径) 来降低误差量级。尺寸突变误差等价于在传输线中引入一个附加的电容 C_0 ^[3]。实验证实, 选择信号输入端与高压臂之间的过渡线长度可以有效地“补偿”这项误差, 它的作用类似于一个“补偿”电感。在过渡线长度 $l \sim D$ 时, 得到了较好的“补偿”效果。(3) 同轴分压器的理想匹配状况应该是在任意横截面上都获得完全匹配。因此, 圆柱形分压器的频率特性具有一定限制。为改善这种特性, 可降低高压臂单位长度的电阻值, 它的主导思想是减小柱形剖面与 (完全匹配的) 曲线形剖面间的平均径向尺寸差别。

对分压器的耐压水平而言, 导致其破坏的不是径向击穿, 易出现的是沿电阻表面的电击穿, 或电阻螺旋线被击穿, 或表面过热产生火花烧损。一般可采用下式估计耐压极限强度^[3]:

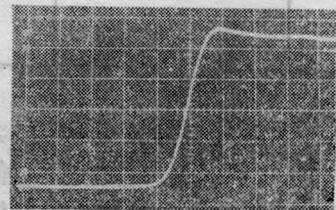
$$U_k = 300(pL_1)^{0.5} \text{ (V)} \quad (3)$$

其中 p 为气压 (Torr), L_1 为电阻长度 (cm), 此式对脉宽为 10^{-6} s 脉冲有效, 一般 U_k 值和脉宽成反比关系。我们令 $U'_k = 0.7U_k$ 为分压器的耐压强度。由于频率特性的限制, 分压器的长度选择有一最佳范围。另外高压信号会在传输线突变面处, 或曲率半径差别较大的导体间发生闪烁现象, 这种瞬间击穿并不破坏绝缘状况, 但信号却由于局部瞬时短路而消失。这种现象可通过改造输入连接方式和控制引出线孔的径向尺寸来消除。

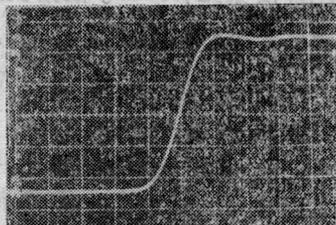
表 1 列出了我们研制的一组分压器的主要数据, 它们的耐压强度达到 $U'_k \geq 60 \text{ kV}$ 。分压器的连接部分采用旋转伸缩式。图 1 是分压器的校正照片, 其中使用 XC-30 型高频信号发生器 (上升时间优于 0.5 ns) 和示波器 (上升时间 1 ns) 可推算出, 本组分压器的上

表 1 分压器的主要数据

| 分压比 D_p | 高压臂 $R_1(\Omega)$ | 低压臂 $R_2(\Omega)$ | 终端 $R_0(\Omega)$ | 长度 $L_0(\text{mm})$ | 外径 $D(\text{mm})$ |
|-----------|-------------------|-------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| 52.6 | 1677 | 56.7 | 75 | 340 | 102 |
| 29.03 | 1077 | 78.77 | 75 | 330 | 103 |
| 9.71 | 325.3 | 74.34 | 75 | 440 | 103 |



(a) 输入分压器前



(b) 输入分压器后

图 1 分压器校正照片

(时标为 1 ns/div)

升时间 $t_r = 0.8 \sim 0.9$ ns, 通频带宽度 $\Delta f = 450 \sim 400$ MHz。

此外, 传输线中介质损耗也将使信号发生畸变, 对一定脉宽的信号而言, 应当有一个传输线的长度限制。实验观察了在不同的传输线 ($Z_0 = 75 \Omega$) 长度下信号的畸变, 在总长 $L \leq 25$ m 时, 脉宽为 10 ns 的信号因衰减产生的畸变可以忽略, 这和文献[2]中的理论推算是相近的。为了抑制电磁干扰, 一般需考虑对电源、接地装置、屏蔽装置的统筹处理。对电源装置采取隔离稳压加滤波处理, 设计了一台对称 π 型低通滤波器, 见图 2。其截止频率 $f_c \sim 10^4$ Hz。为降低地电位起伏误差, 采用共点联接及长线延时的接地方式, 首先消除地电位之间的初始相对起伏, 其次隔离瞬时的地电位振荡波; 除分压器采取整体式屏蔽设计外, 全系统进行多重屏蔽并联接为完整网路。

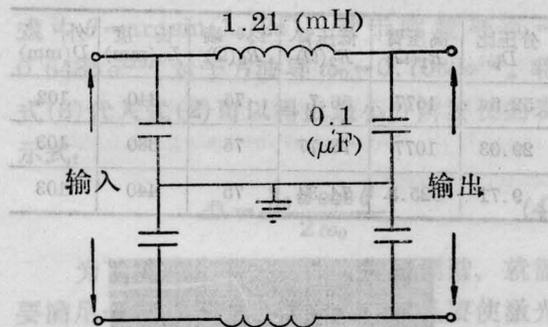


图 2 对称 π 型低通滤波器
截止频率 $f_c \sim 10^4$ Hz; 标称阻抗 $R \sim 77.8 \Omega$

采用上述措施, 在对准分子器件放电电压的测量中, 信噪比 $\beta > 15$ 。根据误差理论^[3]推算, 该测量系统的时间误差 $< 4\%$, 幅值误差 $< 8\%$ 。

三、实验结果

应用上述测量系统, 测量了准分子体系的放电电压波形, 图 3、4、5 分别表示用 $D_p \approx 10$ 、30、50 的分压系统得到的 KrF、XeCl 准

分子体系的电压波形照片。由图可见上升时间 $t_r \approx 17 \sim 18$ ns, 主峰的 FWHM ≈ 11 ns, 后沿约 3 ns, 峰值 $U_0 \approx 20$ kV, 电压上升速率 $\sim 10^{13}$ V/s, 放电电压可分为三个特征区: ① 形成区, 放电脉冲借助于很快的上升速率来达到很高的过压击穿峰值, 这是 Blumlein 线路的主要特点之一; ② 击穿区, 气体着火后, 仅几个 ns 便全部导通, 这种击穿过程比通常的雪崩放电进行的还要迅速, 它属于典型的过压击穿形式; ③ 稳态放电区, 它的幅值

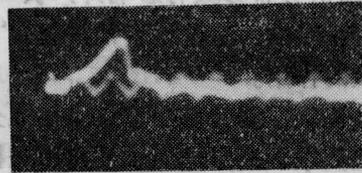


图 3 KrF 体系 ($F_2:Kr:He = 0.3:8:89.7$)
的放电电压波形
预电离电压 34 kV; 主放电电压 42 kV; 时标: 10 ns/div;
分压比 $D_p = 52.6$; 曝光 3 次

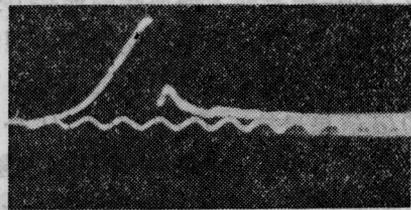


图 4 XeCl 体系 ($HCl:Xe:He = 4:15:2.5$ atm)
的放电电压波形
预电离 40 kV; 主放电 34 kV; 时标: 10 ns/div;
分压比 $D_p = 29.03$; 曝光 2 次

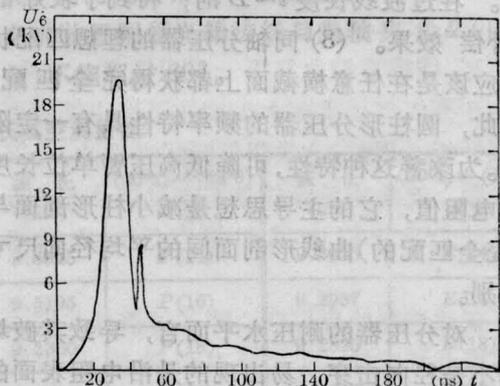


图 5 XeCl 体系的放电电压波形
主放电电压 39 kV; 预电离电压 42 kV; $D_p = 9.71$;
 $HCl:Xe:Ne:He = 6$ Torr:15 Torr:10 atm:2 atm

从初始的3kV逐渐降至1kV左右,约200 ns转入低压的振荡区间。稳态区是放电能量耦合的主要区间。实验中也注意到,在充电电压 U_0 的常用工作范围内, U_b 值一般均低于理论预言的 Blumlein 线路具有的倍压击穿值。

四、过压击穿倍率与倍压现象

Blumlein 装置依靠低电感及其他参数特性,可以产生上升速率很高的电压脉冲,从而获得很高的过压击穿值。依靠过压击穿不仅产生了很高的泵浦功率值,也保证了储存能量在短时间内释放完毕。

设静态击穿值为 U_{b0} ,本装置中 $U_{b0} \sim 1.5\text{kV}$,则过压击穿峰值 U_b 可表示为:

$$U_b = \delta \times U_{b0} \quad (4)$$

其中 δ 为过压倍率,它正比于脉冲上升速率 v_t 。图6是XeCl体系中不同气氛比对应的 δ 变化曲线。 δ 值和电压上升速率 v_t 成单调增长关系,随着 v_t 增大, δ 曲线的斜率有逐渐减小的趋势。因为 v_t 值也依赖于充电电

压 U_0 ,所以,当 v_t 增大(即 U_0 加大)时,获得高倍率过压击穿就更为困难。

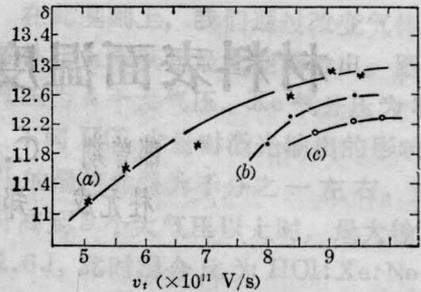


图6 XeCl 体系中电压过压倍率 δ 和上升速率 v_t 的函数关系

(a)—HCl: Xe: He=3.5 Torr: 15 Torr: 3 atm

(b)—HCl: Xe: He=5 Torr: 30 Torr: 3 atm

(c)—HCl: Xe: He: Ne: Ar

=4 Torr: 15 Torr: 1.4 atm: 1.4 atm: 0.2 atm

参 考 文 献

- [1] 清华大学编;“冲击大电流技术”,科学技术出版社,1978年。
- [2] R. A. 米夏兹等;“高压毫微秒脉冲的形成”,原子能出版社,1975年。
- [3] 李惕碛;“实验的数学处理”,科学技术出版社,1980年。
- [4] 陈建文等;《中国激光》,1983,10, No.7, 399。

我国第一台“激光散斑电脑验光仪”研制成功

综合应用激光散斑效应和电脑技术,进行人眼屈光不正检查的“JSB-1型激光散斑电脑验光仪”于1985年3月27日在合肥市通过鉴定。该仪器的研制系安徽省科委下达的科技攻关项目,由中国科学技术大学、安徽大学承担,安徽医学院附属医院、安徽省医疗器械厂参加研制的。

该仪器属国内首创,填补了我国的一项空白。鉴定委员会对该仪器进行了测试和使用研究,结果表明,仪器设计合理,各项性能指标达到或超过了原定的攻关技术指标。同时,其主要技术性能也达到了当前国外同种仪器的水平,并且测量精度和最小分辨精度两项指标超过了上述仪器,设计有创新。该

仪器的研制成功,为开展激光医学应用和激光眼科学的研究提供了一种新的手段。

这台仪器具有不需扩瞳即可准确测定屈光不正(近视、远视、散光)眼及老光眼的功能,经300余病例证明,其准确性与扩瞳检影验光完全相符;该仪器还能测定人眼调节范围,并可一次性测出近用镜度数。该仪器测量速度快、方法简便,便于临床应用,特别适用于大多数人群的普查和矫治,加之成本远低于各类进口电脑验光仪器,故利于推广应用。经研究已决定立即投入小批量生产,以满足社会需要。

(王宝城)