

文章编号:1000-582X(2010)07-023-06

## 模拟微弱 PD UHF 信号纳秒级陡脉冲源的研制

唐 炬,麻守孝,张晓星,许中荣

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**针对电气设备超高频法检测局部放电的定位和定量校正需要,设计了一种纳秒级陡脉冲源,构建了相应的电路模型,用 Pspice 仿真分析了储能电容和电源电压对产生陡脉冲波形的影响。该纳秒级陡脉冲源在储能电容为 10、20 pF 时,脉冲上升陡度分别达到 0.68、0.90 ns,脉宽分别为 0.98、1.18 ns,脉冲峰值分别为 8.72、12.2 V,产生的局部放电量为 320、600 pC,用研制的套筒单极子天线接收的多路陡脉冲信号稳定,误差小于 70 ps,可以用于超高频法检测局部放电的定位和定量校正试验研究。

**关键词:**纳秒;陡脉冲源;局部放电;定位;校正

**中图分类号:**TM835

**文献标志码:**A

### Development of a sub-nanosecond steep pulse generator for simulating weak PD UHF signal

TANG Ju, MA Shou-xiao, ZHANG Xiao-xing, XU Zhong-rong

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In need of ultra-high frequency partial discharge location and correction of electrical equipment, we designed a sub-nanosecond steep pulse generator, and constructed the corresponding circuit model through the circuit simulation software Pspice. The influence of the storage capacitor and the supply voltage to the pulse waveform is analyzed. When the storage capacitor is 10 pF and 20pF respectively, the output pulse waveforms have been measured in the conditions of pulse rise time being 0.68 ns and 0.90 ns, pulse width being 0.98 ns and 1.18 ns, pulse peak being 8.72 V and 12.2 V respectively, and partial discharge capacity of charge being 320 pC and 600 pC. The picked multi-pulse signals are steady with the developed sleeve monopole antenna, the error is less than 70 ps. It can be used for the experimental study of ultra-high frequency partial discharge location and correction of electrical equipment.

**Key words:** sub-nanosecond; pulse generators; partial discharges; location; calibration

局部放电(Partial Discharge, PD)超高频(Ultra-high Frequency, UHF)检测技术具有良好的抗干扰能力,得到了越来越广泛的应用,并研制出相应的 PD UHF 在线监测系统<sup>[1-3]</sup>。然而,用 UHF 法

检测 PD 的定位和定量问题一直是该领域的难点<sup>[4-5]</sup>。要解决这一难题首先需要一种能模拟微弱 PD UHF 信号的陡脉冲源。国内外有专家设计了几种类型的脉冲源,其中华北电力大学和瑞士 ETH

收稿日期:2010-02-10

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助(2009CB724506)

作者简介:唐炬(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,973 首席科学家,主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究,(E-mail)cqtangju@vip.sina.com。

大学各自研制了以水银继电器为电路开关的脉冲源<sup>[6-7]</sup>,西安交通大学以高压脉冲放电管为电路开关设计了脉冲源<sup>[8]</sup>。但都存在上升沿和下降沿陡度不够高,过冲太大,重复性较差等不足,其性能指标不能满足 UHF PD 检测的定位和定量研究。

笔者根据 UHF PD 检测的特点和定位与定量校正要求,研制出一种可调的纳秒级陡脉冲源。该陡脉冲源产生的脉冲波形重复性好,既可用于 UHF 检测 PD 信号的灵敏度校准,也可用来研究基于时间差定位 PD 信号及放电脉冲幅值与接收天线信号耦合的量化关系校验,同时还能能为 UHF 在线检测 PD 去噪研究提供参考源<sup>[9]</sup>。

### 1 雪崩管特性分析

纳秒级陡脉冲源涉及的关键元件是雪崩三极管,其特性的好坏直接影响脉冲源的性能,选用 BFG480W 型射频 NPN 雪崩三极管。当基极注入为负值( $I_B < 0$ )时,基射结处于反偏,集电极电流  $I_C$  随集电极电压  $U_{CE}$  和  $-I_B$  急剧变化的区域是雪崩区<sup>[10]</sup>。在强电场的加速作用下,阻挡层中的电子获得了较大的能量,当它与附近的原子撞击时可能产生新的电子空穴对,这种连锁反应即是载流子倍增效应<sup>[11]</sup>。图 1 中虚线之间的区域就是雪崩区。

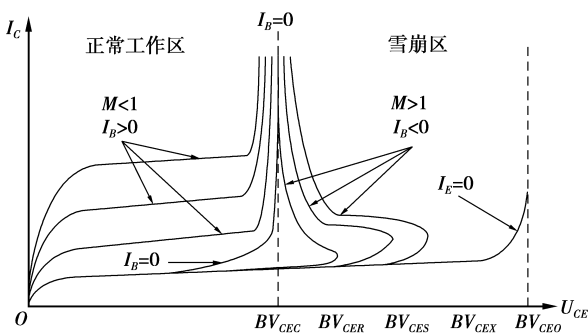


图 1 雪崩区击穿电压间的关系

当电流再继续加大时,会出现二次击穿现象,如图 2 所示。二次击穿区域实际处在整个线性区上方,这个区域也形成一个可观的负阻特性,负阻特性意味着强烈的内部正反馈,在动态形式下可以存储与释放能量<sup>[12]</sup>。利用这一雪崩态特性,可以产生所需的高速度脉冲大电流。

晶体管雪崩区应用的特性参数主要是雪崩上升时间和雪崩脉冲幅度。这 2 个参数不仅取决于管子本身,而且还与具体的工作电路密切相关,改变电路的雪崩电容与负载电阻,所对应的输出脉冲幅度是不同的。通常具有较低击穿电压的晶体管具有更快的雪崩上升时间,较高的脉冲重复周期,但所获得的

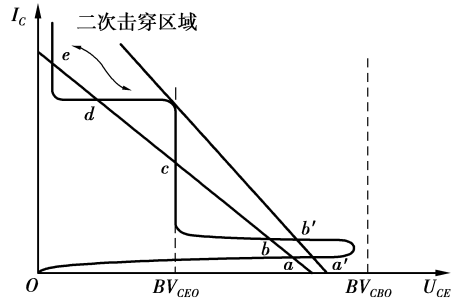


图 2 雪崩晶体三极管的二次击穿

脉冲幅度较低。因此,在使用时需在两者之间权衡<sup>[1]</sup>。

### 2 陡脉冲源的设计

#### 2.1 陡脉冲源电路分析

利用雪崩管工作在雪崩区的开关特性,设计了产生超宽带陡脉冲电路,如图 3 所示。其工作原理为:在没有加入触发脉冲信号时,电源电压  $V_{CC}$  通过  $R_C$  对储能电容  $C$  进行充电, $C$  两端所充的电压等于集电结雪崩击穿电压  $BV_{CBO}$ ,使得雪崩管的集电结偏置在临界雪崩状态。当触发脉冲信号输入时,雪崩管发生雪崩击穿,雪崩电流在电阻  $R_L$  上产生陡脉冲电压信号。

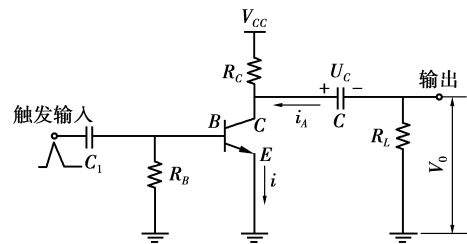


图 3 射频脉冲电路

为了进一步分析雪崩型陡脉冲源的性能,对雪崩三极管导通后的工作电路进行简化,建立的等效电路如图 4 所示。晶体管雪崩导通时储能原件  $C$  向负载电阻  $R_L$  放电, $L_0$  表示放电回路总的引线电感和晶体管雪崩状态的有效电感之和, $C_0$  表示晶体管雪崩时的等效电容, $R_0$  表示晶体管雪崩导通时的有效电阻。

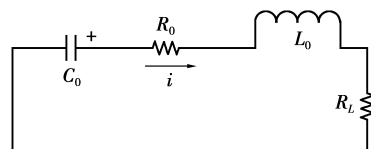


图 4 晶体管雪崩放电等效电路

该电路的回路方程为:

$$L_0 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_0} i(t) = 0, \quad (1)$$

式中  $R=R_0+R_L$ 。电路的初始条件为:  $i(t-t_0)=0$ ,  $V_C(t-t_0)=U_0$ ,  $U_0$  为雪崩电容上的初始放电电压。

当  $t_0=0$ , 且  $R > 2\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  时, 满足非周期放电条件, 可得到:

$$i(t) = \frac{U_0 C_0 p_1 p_2}{p_1 - p_2} (e^{-p_1 t} - e^{-p_2 t}), \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= R/2L_0 - \sqrt{(R/2L_0)^2 - 1/L_0 C_0} \\ p_2 &= R/2L_0 + \sqrt{(R/2L_0)^2 - 1/L_0 C_0} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

此时串联回路处于过阻尼响应状态, 因此, 当  $t=t_m$  时,  $i(t)$  达到最大值  $i_m$ , 即  $di/dt=0$ , 可得

$$t_m = \frac{\ln(p_2/p_1)}{p_2 - p_1}, \quad (4)$$

$$i_m = \frac{U_0 C_0 p_2 p_1}{p_2 - p_1} (e^{-p_1 t_m} - e^{-p_2 t_m}), \quad (5)$$

当  $t=t_k$  时,  $i(t_k)=i_m/2$ , 因  $e^{-p_1 t_k}=e^{-p_2 t_k}$ , 故可忽略式中的第 2 项, 得到

$$t_k = \frac{1}{p_1} \ln\left(\frac{e^{-p_1 t_k} - e^{-p_2 t_k}}{2}\right). \quad (6)$$

因此, 改变放电回路中  $C_0$ 、 $L_0$  值可以改变  $t_m$ 、 $t_k$  和  $i_m$ , 且  $t_m$ 、 $t_k$  和  $i_m$  与输出脉冲的上升沿时间  $T_r$ 、半幅度时间  $T_w$  和幅度  $I_m$  相对应。

### 2.2 陡脉冲源特性分析

用 Pspice 电路仿真软件对图 3 中电路在各种不同的参数情况下进行了仿真分析, 研究电源电压  $V_{CC}$  和电容  $C$  对输出脉冲波形的影响规律。

#### 2.2.1 电源电压 $V_{CC}$ 的影响

通过逐渐升高电源电压  $V_{CC}$  来观察产生的脉冲, 对应不同电源电压下的输出脉冲波形如图 5 所示, 其特性数据如表 1 所示。随着电源电压的逐渐升高, 电容上积累的电荷增多, 输出负脉冲的幅度增大。电源电压的影响主要是脉冲的幅度, 脉冲上升时间和下降时间在电源电压增大的过程中变化比较缓慢, 而电源电压的变化对脉冲宽度的影响很小。电源电压过高, 可能烧坏雪崩管, 过低则影响脉冲的输出幅值。另外, 由于射频雪崩管存在参数和性能

表 1 晶体管在不同电压值时的脉冲性能  
( $C_1$  为  $1 \mu\text{F}$ ,  $R_B$  和  $R_C$  为  $1.0 \text{ k}\Omega$ )

电源电压 $V_{CC}/\text{V}$	上升时 间/ $\mu\text{s}$	下降时 间/ $\mu\text{s}$	脉冲宽 度/ $\mu\text{s}$	脉冲幅 度/ $\text{V}$
5	290.8	575.8	438.2	-3.12
10	336.8	566.8	440.8	-5.72
15	373.5	617.8	448.6	-8.13
20	378.6	657.2	480.6	-10.4

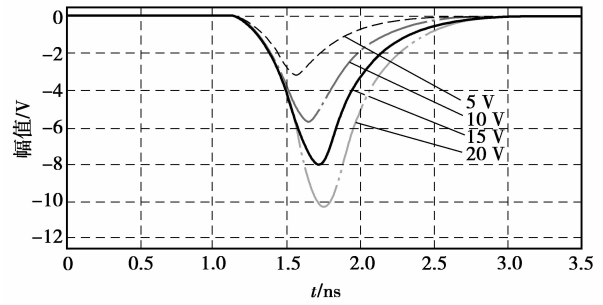


图 5 不同电源电压下的脉冲

的分散性, 每个管子产生雪崩效应的电压并不完全相同, 因此对每个电路都应进行单独的调试, 以保证脉冲电路可靠有效的工作。同时为了获得更大的放电峰值, 可将以射频雪崩管为核心器件的脉冲电路做成级联的 Marx 电路。

#### 2.2.2 雪崩电容 $C$ 的影响

对  $C$  的值从  $2\sim 20 \text{ pF}$  进行了仿真测试, 对应电源电压下的输出脉冲波形如图 6 所示, 其特性数据如表 2 所示。电容  $C$  对输出脉冲的各项性能都有影响, 其值越大, 所产生的脉冲幅度越大, 但脉冲上升沿、下降沿和脉冲宽度也同时增大; 在增大到  $20 \text{ pF}$  以后, 脉冲幅度的增加已经不明显, 而脉冲的宽度和下降时间的增加却很显著, 若继续增大电容值, 陡脉冲性能也会进一步的下降, 脉冲宽度和幅度之间存在着相互制约。要想获得较大的幅值, 储能电容  $C$  就应尽量增大, 但同时脉冲的时间参数受影响较大, 如想获得较小的脉冲陡度, 储能电容  $C$  应减小, 但此时的幅值幅度较小, 因此需要在两者之间权衡取舍。

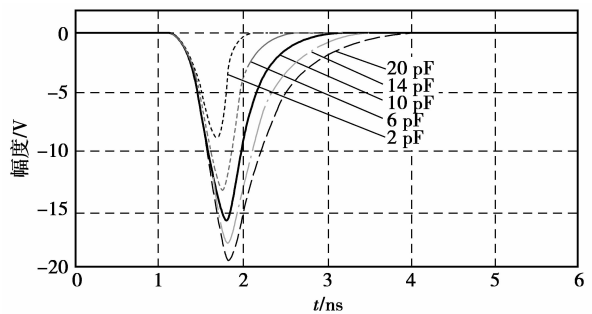


图 6 不同储能电容  $C$  下的脉冲

表 2 晶体管在不同电容值时的脉冲性能  
( $V_{CC}$  为  $24 \text{ V}$ ,  $C_1$  为  $1 \mu\text{F}$ ,  $R_B$  和  $R_C$  为  $1.0 \text{ k}\Omega$ )

电容 $C/\text{pF}$	上升时 间/ $\mu\text{s}$	下降时 间/ $\mu\text{s}$	脉冲宽 度/ $\mu\text{s}$	脉冲幅 度/ $\text{V}$
2	309.1	190.8	354.8	-8.3
6	365.2	696.6	474.7	-12.7
10	448.9	1 108.6	698.9	-16.1
14	535.6	1 568.9	910.4	-17.8
20	640.2	1 980.4	1 210.8	-19.2

### 2.3 参数选取原则

高压窄带陡脉冲源属高速电路,电路形式和器件的选择将严重影响其性能指标,主要有电路物理结构以及雪崩管、电容、电阻等的选择。

#### 2.3.1 电路物理结构

纳秒级陡脉冲高频特性要求元件的引线要短,电路板布线紧凑合理,以尽量减小分布杂散参数带来的影响,应按照传输线的原理进行布线。本设计选用 FR4 玻璃环氧衬底板,用传输线仿真软件 T xline 对布线走向进行仿真,使信号匹配传输,以减少反射,其布线参数与基板厚度如图 7 所示。

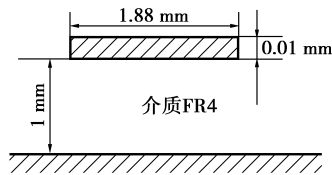


图 7 布线参数

#### 2.3.2 雪崩管选择

为了使脉冲电路能够安全可靠工作,雪崩管在高重复频率下引起的功耗应当小于  $P_{max}$ 。为了得到快前沿的脉冲,雪崩管的截止频率  $f_a$  应尽量大些,选用 BFG480W 射频雪崩三极管,其主要特性参数为:特征频率  $f_T = 23$  GHz,集电极-发射极雪崩击穿电压  $BV_{CEO} = 4.5$  V,集电极-基极雪崩击穿电压  $BV_{CBO} = 14.5$  V。经测试,当电源电压为 22 V 左右时,管子处于雪崩状态,可以获得良好的陡脉冲。

#### 2.3.3 电容和电阻选择

雪崩脉冲电路的工作频率不受基极触发脉冲控制,主要取决于电源电压对  $R_C$ 、 $R_L$  和  $C$  形成的充电时间常数  $\tau = (R_C + R_L)C$ 。 $R_C$  应根据雪崩电路所要求的工作频率  $f$  来选取,研究表明  $R_C$ 、 $R_L$  只要满足  $(3 \sim 5)\tau < 1/f$  即可。储能电容  $C$  的容量主要根据雪崩输出的脉冲幅度、宽度以及上升沿的快慢来决定,笔者选择 2 种电容,分别为 10、20 pF。

#### 2.4 电路的制作与性能实测

笔者均使用微波贴片电容、电阻器件,以减少器件本身的寄生参数和缩小电路体积。电源进行滤波处理,以免电源的波动导致器件的损坏。同时对器件的接地采取单点就近接地原则可以减少信号在地线上的串扰。制作的实际电路如图 8 所示。

图 9 为直流电源电压为 24 V,  $(R_C + R_L) = 50 \Omega$ ,储能电容分别为 10、20 pF 时的陡脉冲源实测波形,其脉冲参数如表 3 所示。可以看出实测结果

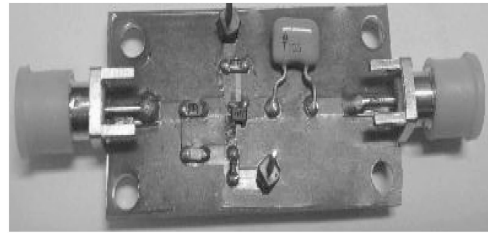


图 8 陡脉冲源实物图

与仿真和理论推导基本一致。至于实测波形存在小的震荡拖尾现象是由于不能完全避免寄生电容和杂散电感所致,它的存在不会对该脉冲源用于 UHF PD 定位与定量研究造成大的影响。

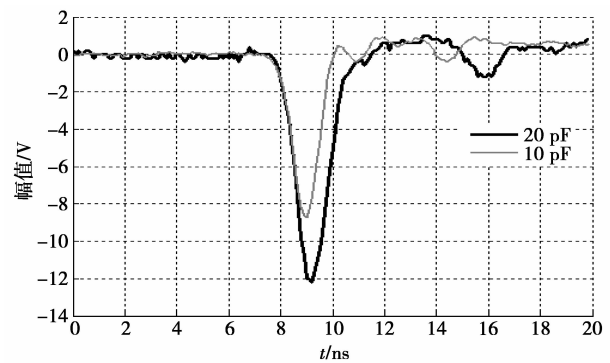


图 9 陡脉冲源实测波形

表 3 实测脉冲参数

电容 $C$ /pF	上升时 间/ns	下降时 间/ns	脉冲宽 度/ns	脉冲幅 度/V
10	0.68	1.20	0.98	-8.72
20	0.90	1.50	1.18	-12.2

### 2.5 等效放电量计算

根据局部放电脉冲电流的指数函数计算式<sup>[13-14]</sup>:

$$i(t) = \frac{I_m}{T_r} t e^{(1-\frac{t}{T_r})}, \quad (7)$$

其中:  $t$  为时间,  $I_m$  和  $T_r$  为电流脉冲峰值和上升沿时间。可得脉冲放电量  $q$  的计算为:

$$q = e I_m T_r = e \frac{U_m}{R_C} T_r, \quad (8)$$

其中:  $U_m$  和  $R_C$  分别为脉冲的电压峰值和耦合电阻,  $e = 2.718 3$  eV。因此,图 9 中储能电容  $C$  分别为 10、20 pF 所对应的脉冲放电量为 320、600 pC。

### 3 陡脉冲源的应用

为了说明该陡脉冲源能够用于 PD 的定位研究和定量校正,利用相同 UHF 天线来发射和接收方法来测量其信号。笔者采用研制的套简单极子天线<sup>[15]</sup>进行信号发射和接收,此天线驻波比小于 2 的带宽为 350~500 MHz,中心频率为 425 MHz。

#### 3.1 陡脉冲源在 PD 定位中的应用

关于 PD 定位方法,国内外研究最多、相对效果较好的还是时间差定位法<sup>[7]</sup>,依据的是多传感器接收 PD 信号的时间信息特征,计算出彼此间的时间差。因此,时间的准确测量是定位准确的关键。获取时间的方法通常是测量信号具有同一特征的某一点时间,然后算出其差值<sup>[8]</sup>。方法虽然简单,但受干扰的影响经常出现虚假的特征点,影响时间测量精度,进而对 PD 定位造成较大误差。笔者所设计的陡脉冲源在变压器箱体(3.10 m×2.35 m×2.05 m)内模拟 PD 放电,用 2 个套简单极子天线传感器在不同位置进行测试,可在示波器上获得明显的时间差信号,如图 10 所示,进而运用基于时间差定位算法对 PD 点进行定位。

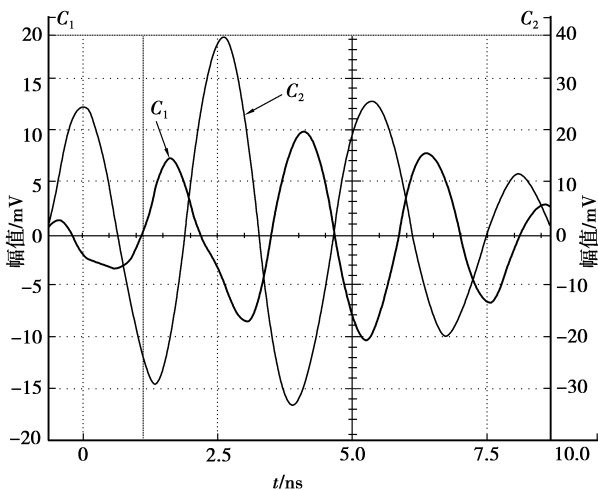


图 10 示波器显示实测两信号时延时间

选用一个发射天线作 PD 源,2 个接收天线对其进行测量,改变 2 个接收天线与发射天线之间的距离,可测得相应的时延时间,将实际的距离差和测得的时延时间进行比对,可得所测到的时延测量误差都在 70 ps 以内,对应的实际距离即在厘米级,随着实际距离的增大接收信号能量减小导致测量误差有所增大,但测量误差完全在测量误差允许范围之内<sup>[16]</sup>,如图 11 所示。该陡脉冲源可用于对 PD 定位的时间差定位算法进行校验。

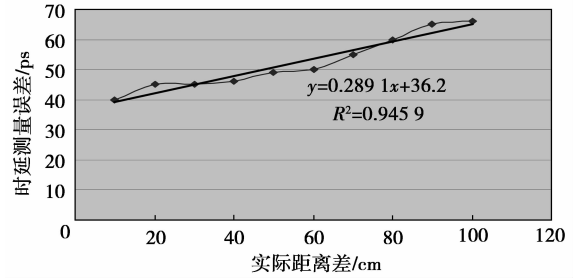


图 11 不同距离差下时延测量误差

#### 3.2 放电脉冲幅值与 UHF 信号的量化关系

利用 UHF 检测 PD 的量化问题至今仍未解决,已成为 UHF 定量检测的瓶颈。由于 PD 所产生的陡脉冲电流可激发 UHF 信号,因此只要得到 PD 与 UHF 信号幅值的对应关系,就可用 UHF 信号来表征 PD 激烈程度。

这里仍然采用相同天线测量法,将一个天线传感器作为发射源,另一个作为接收传感器,两者距离为 12 cm,改变发射陡脉冲源幅值,测得在不同脉冲幅值下的 UHF 信号,得到放电脉冲幅值与 UHF 信号的量化关系曲线,如图 12 所示。对放电脉冲幅值与 UHF 信号的量化关系曲线进行拟合,在天线距离为 12 cm 时,陡脉冲源脉冲幅值与 UHF 信号幅值之间存在拟合程度高的线性关系。

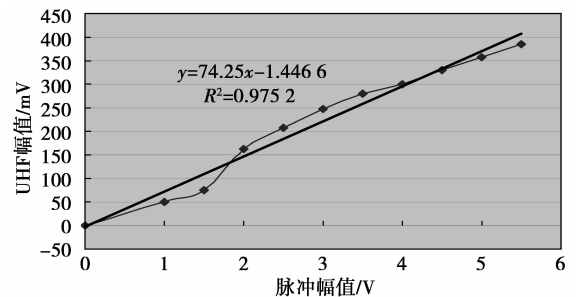


图 12 放电脉冲幅值与 UHF 信号的量化关系

### 4 结 论

1)设计了基于射频雪崩三极管的陡脉冲源电路,阐明了工作原理,给出元器件的参数和选取原则以及布线方法,推导了产生纳秒级陡脉冲的数学表达式,分析了储能电容和电源电压对脉冲波形的影响。

2)选择储能电容为 10、20 pF 时,可分别产生 680、900 ps 的脉冲上升沿,幅值可达 8.72、12.2 V,对应的模拟局部放电量分别为 320、600 pC 的,能用于超高频局部放电的放电量标定。

3)该陡脉冲源产生的波形稳定,用多传感器接

收信号的时延误差小于 70 ps,能满足局部放电定位研究的要求。同时,利用用相同天线测量法,得到放电脉冲幅值与 UHF 信号幅值的线性拟合量化关系,能方便 UHF 法检测 PD 的定量校正。

#### 参考文献:

- [1] 孟延辉,唐炬,许中荣,等. 变压器局部放电超高频信号传播特性仿真分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(5): 70-74.  
MENG YAN-HUI, TANG JU, XU ZHONG-RONG, et al. Simulation propagation of partial discharge UHF signals in transformer [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(5): 70-74.
- [2] 赵晓辉,路秀丽,李彦明,等. 超高频方法在变压器局部放电检测中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 111-114.  
ZHAO XIAO-HUI, LU XIU-LI, YANG JING-GANG, et al. Application of Ultra-high-frequency Partial Discharge Detection in Power Transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 111-114.
- [3] BAKER P C, MCARTHUR S D J, JUDD M, et al. Data management of on-line partial discharge monitoring using wireless sensor nodes integrated with a multi-agent system[C]// International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Nov. 5-8, 2007, National Sun Yat-Sen University, Taiwan, China. [S. l.]: IEEE, 2007:1-6.
- [4] PUTERS W R, VANDEN A P, LAPP A, et al. Transformer PD measurements: field experience and automated defect identification [C]// XIII International Conference on Gas discharges and their Application, Sept. 3-8, 2000, Glasgow, UK. [S. l.]: IEEE, 2000: 85-89.
- [5] STRACHAN S M, RUDD S, JUDD M D, et al. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 259-268.
- [6] 汤明,李成榕. 纳秒级高斯脉冲源的研制及其在 GIS 局部放电研究中的应用[J]. 电网与水力发电进展, 2008, 24(6):21-25.  
TANG MING, LI CHENG-RONG. Development of a nano-second gauss pulse signal generator and its application in GIS partial discharge signals study[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24(6): 21-25.
- [7] NEUHOLD S M, BENEDICKTER H R, SCHMATZ M L. A 300 V mercury switch pulse generator with 70 psec risetime for investigation of UHF PD signal transmission in GIS[C]// International Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 23-27, 1999, London, England. [S. l.]: IEEE, 1999:78-81.
- [8] 李军浩,王晶,王颂,等. 亚纳秒高压脉冲发生器的研制及仿真[J]. 高压电器, 2006, 42(3), 186-187.  
LI JUN-HAO, WANG JING, WANG SONG, et al. Simulation and development of subnanosecond high-voltage pulsed source[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3):186-187.
- [9] PROTIVA P, MRKVICA J. Sub-nanosecond pulse generator for through-the-wall radar application[C]// Microwave Conference, 2009(EuMC 2009), Sept. 29-Oct. 1, 2009, European. [S. l.]: IEEE, 2009: 1904-1907.
- [10] CAMPBELL S A. 微电子制造科学原理与工程技术 [M]. 2 版. 严利人,等,译. 北京:电子工业出版社, 2003: 267.
- [11] DING Z J, HAO Q, HU L, et al. All solid-state repetitive semiconductor opening switch-based short pulse generator[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(9):093303-1-093303-3.
- [12] KOTAKI H, OISHI Y K, NAYUKI T, et al. Focusing quality of a split short laser pulse[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(3): 036102-1-036102-3.
- [13] JUDD M D, LI Y, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2):5-14.
- [14] JUDD M D, LI Y, HUNTER I B B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors, Part 2: field experience [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3):5-13.
- [15] 唐炬,许中荣,孟延辉,等. 一种用于变压器 PD 检测的套简单极子天线传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(9):1654-1659.  
TANG JU, XU ZHONG-RONG, MENG YAN-HUI, et al. Study on sleeve monopole antenna for partial discharge detection in transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(9):1654-1659.
- [16] 唐志国,李成榕,黄兴泉,等. 基于辐射电磁波检测的电力变压器局部放电定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):96-101.  
TANG ZHI-GUO, LI CHENG-RONG, HUANG XING-QUAN, et al. Study of partial discharge location in power transformer based on the detection of electromagnetic waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):96-101.

(编辑 王维朗)