

文章编号: 1001-4322(2008)04-0697-04

可调间隙亚纳秒气体开关的研制*

张现福, 陆 巍, 陈志刚, 谢 平, 廖 勇, 杨周炳, 刘天文

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 设计了一种高工作电压、高重复频率的亚纳秒气体开关, 该开关由 Peaking 间隙和 Chopping 间隙组成, 可以将纳秒信号转化为亚纳秒脉冲。开关腔外有两组调节旋钮, 分别用来调节 Peaking 间隙和 Chopping 间隙, 使输入脉冲的前后沿能同时得到锐化。对设计的开关进行的实验研究结果表明: 在系统重频 5 Hz 运行时, 开关能稳定输出电压 278 kV、脉宽 620 ps 的脉冲; 在系统重频 100 Hz 运行时, 开关能稳定输出电压 270 kV、脉宽 700 ps 的脉冲。

关键词: 脉冲功率源; 可调间隙开关; 亚纳秒脉冲; 气体开关; 锐化

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A

超宽带脉冲源^[1-2]产生的超宽带电磁脉冲具有宽频带特性, 较容易覆盖目标的响应频率, 在雷达目标识别、探测地下物体和隐蔽物体、遥感等方面具有广阔的应用前景。亚纳秒开关是高功率超宽带脉冲源中的关键部件之一, 包括气体开关、液体开关和固体开关, 它们可产生高重复频率快前沿的脉冲。快前沿沿包含频谱的高频分量, 利于辐射。高压气体开关的关键是在间隙内建立强电场, 电子雪崩的传播速度与电极间电场成正比, 而间隙闭合是由间隙电场决定的。为得到快脉冲, 要求电极间隙的充电电压要远远超过它的自击穿电压。亚纳秒气体开关的特点是短间隙(1~2 mm)、高压(约 10 MPa)、快速充电(1~2 ns 上升时间), 此时可以在过电压(200%~300%)下自击穿, 击穿时气体间隙中电场高达 MV/cm 量级, 且开关闭合非常快, 其输出脉冲的前后沿均可达到几百 ps。国内外学者对此极端条件下的气体放电特性在理论和实验等方面开展了大量工作^[3-7], 但有关外部带有调节装置的亚纳秒气体开关的研究还很少^[8-9]。本文设计了一种开关腔外带有调节旋钮的高压氮气亚纳秒开关, 能够对脉冲的前后沿同时进行锐化, 该开关体积小, 结构紧凑。

1 理论计算及设计

1.1 开关气压设计

火花间隙开关在放电过程中, 火花电阻从高阻值变化到接近于零, 在此过程中引入一个与火花电导率增长有关的特征时间常数 θ 来描述, 火花间隙的时间常数为^[10]

$$\theta = 2pd^2/aV_b^2 \quad (1)$$

式中: θ 的单位为 s; p 为开关中所充气压(0.1 MPa); d 为间隙距离(cm); V_b 为开关击穿电压(V); a 为弧道电阻系数。若开关击穿时的电压 V_b 不变, 则由巴森定律: $pd=C$, 这里 C 为常数, 因此 $\theta \propto 1/p$, 即随着气压的增加, 火花电导率的增长时间常数逐渐减小, 导通过程越快。开关的结构如图 1 所示, 由于开关两端分别与阻抗变换及传输线连接, 而阻抗变换和传输线的绝缘介质采用变压器油, 所以开关腔体两端必须采用绝缘支撑来密封气体。在工程设计时, 考虑到开关外壁和绝缘支撑的机械强度, 将开关设计为最大可充 12 MPa 的高纯氮气。不难计算出: 对于 d 为 mm 量级的火花间隙, 开关中气压达到 10 MPa 左右时, 可得到 $\theta < 0.1$ ns。

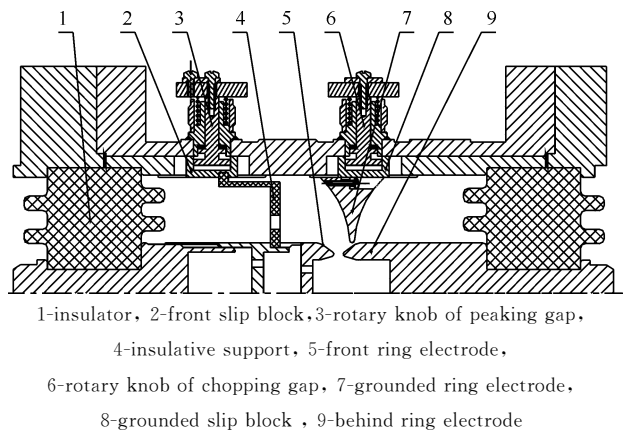


Fig. 1 Structure of gas switch

图 1 开关结构示意图

* 收稿日期: 2007-09-03; 修订日期: 2008-02-29

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 张现福(1980—), 男, 本科, 主要从事超宽带高功率微波技术研究; zhxf802@126.com。

1.2 电极设计

由气体开关的马丁公式可知:脉冲的上升时间是由火花通道的电阻和电感决定的,对于特性阻抗为 z 的传输线路,开关引起的有效脉冲上升时间为^[10]

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_R + \tau_L \quad (2)$$

式中: τ_R 为通道电阻引起的时间常数(ns); τ_L 为通道电感引起的时间常数(ns)。它们的表达式分别为

$$\tau_R = 88(\rho/\rho_0)^{1/2}/(NZ)^{1/3}E_b^{4/3}, \quad \tau_L = L_0/NZ \quad (3)$$

式中: ρ/ρ_0 为气体密度在标准状态下与空气密度之比; E_b 为开关击穿场强($\text{MV} \cdot \text{cm}^{-1}$); L_0 为开关单通道电感; N 为火花放电通道数。由公式(3)可知,要减小开关的时间常数,实现开关的多通道放电是必须的,此时开关电感可以大大降低,开关电阻项时间常数按 $N^{-1/3}$ 关系下降。

亚纳秒开关共有 Peaking 和 Chopping 两个开关间隙,3 个电极。将开关的 3 个电极均设计为环形电极,以期实现开关的多通道放电,降低通道电感,从而减小脉冲的有效上升时间。将前环电极和后环电极的外表面设计为锥面,把接地环电极设计成只能在后环电极锥面的范围内滑动,实现 Chopping 间隙连续可调并使得 Peaking 间隙始终小于前环电极到接地环极的距离,保证 Peaking 间隙未导通时前环电极不对接地环极击穿。

1.3 绝缘设计

根据纳秒下气体击穿经验公式:

$$E = (97\,800/\tau)^{0.291} \rho^{0.709} \quad (4)$$

脉宽为 1 ns 及 2 ns 的脉冲,在 10 MPa 的高压氮气中的击穿场强分别为 269.8 和 220.5 kV/mm,在结构尺寸的设计上,根据气体击穿经验公式和纳秒脉冲在有机玻璃中的击穿场强来考虑绝缘。用 PIC 软件模拟开关电极处和绝缘子处的电场分布,如图 2 所示。结合传输线的结构尺寸和开关电极处的电场分布,将开关内壁半径设计为 49 mm,内导体半径设计为 21.3 mm,Peaking 间隙的最大值为 8 mm。考虑到重复频率、氮气和有机玻璃的纯度等因素的影响,将开关内导体表面最大场强设计为 70 kV/mm,局部场强集中点按 150 kV/mm 设计。将开关绝缘子结构突变处的内导体倒 R_1 圆角时,最大电场强度为 120.9 kV/mm。

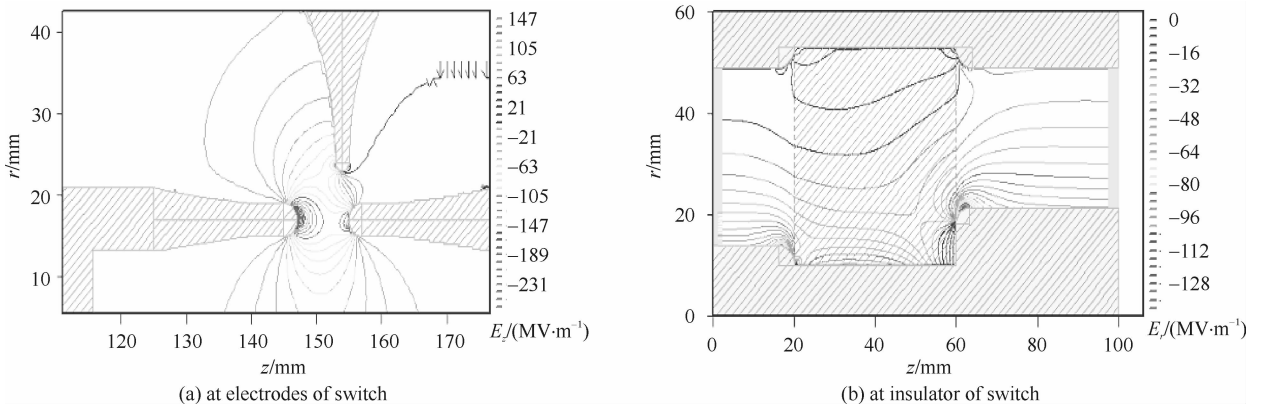


Fig. 2 Electric-field distribution at electrodes and insulator of switch

图 2 开关电极处及绝缘子处的电场分布

1.4 调节旋钮设计

开关共有两组对称结构的调节旋钮,分别用来调节 Peaking 间隙和 Chopping 间隙,每个调节旋钮均有手柄、拨盘、表针、偏心拨轮和滑块组成。调节旋钮的工作原理是:用手柄扳动偏心拨轮,偏心拨轮拨动滑块使其滑动,进而带动开关电极,调节开关间隙。通过设计偏心拨轮的偏心度和后环电极的外锥面锥度来设计开关间隙的可调范围,将偏心拨轮的拨轮半径设计为 8 mm、偏心度设计为 2.5 mm(如图 3 所示)、后环电极的外锥面锥度设计为 30° ,使得 Peaking 间隙在 0~5 mm 间可调,调节精度为 0.1 mm;Chopping 间隙在 0~2.5 mm 间可调,调节精度为 0.05 mm。

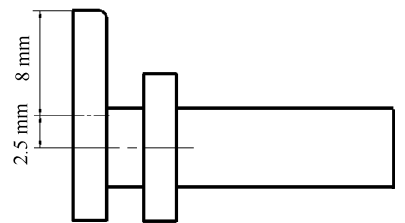


Fig. 3 Centrifugal dial disk

图 3 偏心拨轮

根据开关部件的尺寸,可以推导出开关间隙 d (单位取 mm)与调节旋钮的旋转角度 $\alpha(0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ)$ 之间的

关系式。设偏心拨轮偏心度为 l (单位 mm), 后环电极的外锥面锥度为 β , 最小 Peaking 间隙为 d_{10} , 最小 Chopping 间隙为 d_{20} , 则:

$$\text{Peaking 间隙} \quad d_1 = l(1 - \cos\alpha) + d_{10} \quad (5)$$

$$\text{Chopping 间隙} \quad d_2 = \begin{cases} d_{20}, & \alpha = 0 \\ l(1 - \cos\alpha)\sin\beta + d_{20}\cos\beta, & 0 < \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以分别设计出 Peaking 间隙调节旋钮和 Chopping 间隙调节旋钮的拨盘刻度, 从而可以精确地调节开关间隙。

2 实验结果

将设计的亚纳秒开关应用到高压实验平台上进行实验研究, 纳秒脉冲产生装置输出电压 300 kV、前沿 1.6 ns、后沿 1.2 ns、脉宽 2.4 ns 的脉冲, 如图 4 所示。通过 50 Ω 同轴传输线 TL1 对开关进行充电, 使开关间隙极度过电压(最高可达 300%)而迅速击穿^[3-4], 从而对脉冲的前沿进行锐化; 然后利用接地电极对脉冲的后沿进行锐化, 锐化后的脉冲经过 50 Ω 同轴传输线 TL2 抵达终端匹配负载。纳秒脉冲产生装置输出的电压脉冲通过安装在传输线 TL1 上的同轴电容分压器测量, 开关输出的电压脉冲则通过安装在传输线 TL2 上的同轴电容分压器测量。

在工作气压为 9.5 MPa 时, 系统重频 5 Hz 运行, 调节 Peaking 和 Chopping 间隙, 测试不同间隙时的开关输出。将 Chopping 间隙调至最大, 保持不变, 此时 Chopping 间隙不导通, 脉冲后沿不发生变化。当 Peaking 间隙约 1.6 mm、开关工作稳定时, 输出脉冲幅度比输入脉冲幅度略有降低, 脉冲前沿被有效锐化, 测得开关输出脉冲电压 290 kV、脉冲前沿 580 ps, 波形如图 5(a) 所示。将 Peaking 间隙调至最小, 保持不变, 此时 Peaking 间隙为零, 脉冲前沿不发生变化。当 Chopping 间隙约 1.1 mm, 开关工作稳定时, 输出脉冲幅度比输入脉冲幅度略有降低, 脉冲后沿被有效锐化, 测得开关输出脉冲电压 292 kV、脉冲后沿 420 ps, 如图 5(b) 所示。

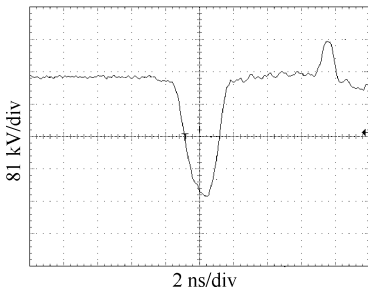


Fig. 4 Input pulse waveform of switch
图 4 开关输入脉冲波形

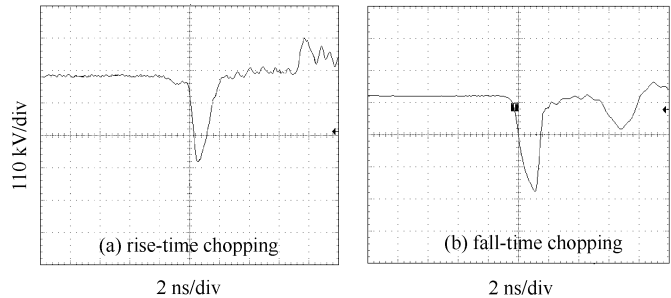


Fig. 5 Waveforms of rise-time and fall-time chopping pulse at 5 Hz repetition-rate

图 5 重频 5 Hz 运行时脉冲前沿和后沿锐化波形

在工作气压为 9.5 MPa 时, 系统重频 5 Hz 运行, 通过同时调节 Peaking 间隙和 Chopping 间隙使开关的工作稳定, 当 Peaking 间隙约 1.6 mm, Chopping 间隙约 1.1 mm 时, 测得脉冲电压为 278 kV、脉宽为 620 ps,

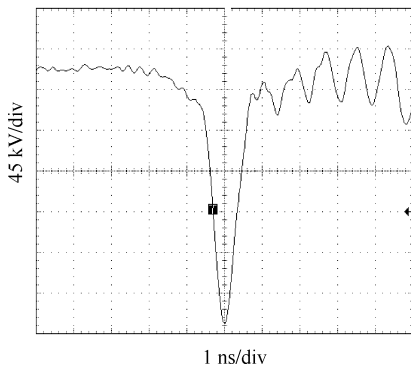


Fig. 6 Waveform of switch's output pulse at 5 Hz repetition-rate

图 6 重频 5 Hz 运行时开关输出脉冲波形

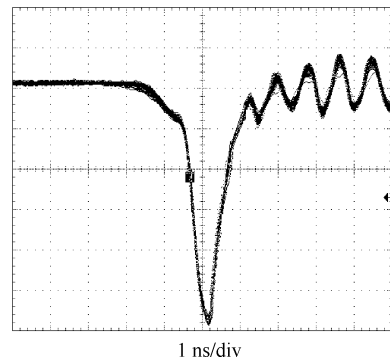


Fig. 7 Superposed waveform of switch's output pulse at 100 Hz repetition-rate

图 7 重频 100 Hz 运行时开关输出脉冲重叠波形

波形如图 6 所示。系统重频 100 Hz 运行,通过同时调节 Peaking 间隙和 Chopping 间隙使开关的输出稳定,当 Peaking 间隙约 1.8 mm,Chopping 间隙约 1.2 mm 时,测得脉冲电压为 270 kV、脉宽为 700 ps,图 7 为连续运行 5 s 时开关输出脉冲的重叠波形。

3 结 论

本文设计的高工作电压、高重频亚纳秒气体开关外部带有两组对称结构的调节旋钮,分别用来调节 Peaking 间隙和 Chopping 间隙,实现了开关间隙外部可调。该亚纳秒开关可以同时输入脉冲的前后沿进行锐化,对开关进行了高压实验研究,实验结果为:在工作气压为 9.5 MPa,Peaking 间隙约 1.8 mm,Chopping 间隙约 1.2 mm 时,系统重频 100 Hz 运行,开关可以稳定输出电压为 270 kV、脉宽为 700 ps 的电压脉冲,基本满足了设计要求。此开关已成功用于产生超宽带高功率脉冲。在实际应用中,高压亚纳秒气体开关采用 H_2 作绝缘介质,比 N_2 , SF_6 等作绝缘介质具有更快的闭合速度和绝缘恢复速度,可以获得更快的上升沿和下降沿。对高压氮气可调间隙亚纳秒开关进行优化设计,可研制高压氢气可调间隙亚纳秒开关。

参考文献:

- [1] 杨周炳,孟凡宝,马弘卿,等. 高功率超宽带脉冲辐射实验装置研制[J]. 强激光与粒子束,2005,17(8):1180-1182. (Yang Z B, Meng F B, Ma H G, et al. Development of high power UWB pulse radiation source. *High Power Laser and Particle Beams*,2005,17(8):1180-1182)
- [2] Prather W D, Baum C E, Lehr J M, et al. Ultra-wideband source and antenna research[J]. *IEEE Trans Plasma Science*,2000,28(5):1624-1630.
- [3] 李桂萍,王新新,袁建生. 亚纳秒气体开关中气体击穿的数值计算[J]. 强激光与粒子束,2004,16(4):540-544. (Li G P,Wang X X,Yuan J S. Numerical calculation of gas breakdown in ultrafast gas switch. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16(4):540-544)
- [4] 石磊,樊亚军,朱四桃,等. 高压氮气亚纳秒开关放电特性实验研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(7):1079-1082. (Shi L, Fan Y J, Zhu S T, et al. Experimental study on discharge characteristics of a subnanosecond high pressure N_2 switch. *High Power Laser and Particle Beams*,2005,17(7):1079-1082)
- [5] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1998,26(3):874-881.
- [6] Frost C A, Martin T H, Patterson P E, et al. Ultrafast gas switching experiments[C]//9th IEEE Intern Pulsed Power Conference. 1993: 491-494.
- [7] 樊亚军,石磊,刘国治,等. Chopping-Peaking 开关形成高功率超宽带双极脉冲的实验研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(4):501-504. (Fan Y J, Shi L, Liu G Z, et al. Generation of high power ultra wide-band bipolar pulse with chopping-peaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16(4):501-504)
- [8] Lehr J M, Baum C E, Prather W D, et al. Aspects of ultrafast spark gap switching for UWB HPM generation[C]//11th IEEE Intern Pulsed Power Conference. 1997:1033-1041.
- [9] 全林,屠荆,樊亚军,等. 重复频率亚纳秒脉冲硬 X 射线发生器[J]. 强激光与粒子束,2007,19(6):1049-1052. (Quan L, Tu J, Fan Y J, et al. Development of a sub-nanosecond rep-rate pulse hard X-ray generator. *High Power Laser and Particle Beams*,2007,19(6):1049-1052)
- [10] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005. (Liu X S. High power pulse technology. Beijing, National Defence Industry Press, 2005)

Development of sub-nanosecond gas switch with adjustable gap

ZHANG Xian-fu, LU Wei, CHEN Zhi-gang, XIE Ping,

LIAO Yong, YANG Zhou-bing, LIU Tian-wen

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

Abstract: A high voltage and high repetition rate sub-nanosecond gas switch is designed. Rise-time and fall-time of a sharpened pulse can be varied by turning two group of rotary knobs outside the cavity to adjust the peaking and chopping spaces. Results of experiments prove that the switch can work steadily at 5Hz repetition rate and output a pulse with 278 kV peak voltage and 620 ps width, or works at 100 Hz repetition rate and output a pulse with 270 kV peak voltage and 700 ps width. The switch has been successfully used in high power pulse systems.

Key words: Pulsed power supply; Adjustable space switch; Sub-nanosecond pulse; Gas switch; Peaking-chopping