



·脉冲功率技术·

自触发紫外预电离开关脉冲击穿时延抖动 影响因素及改进方法*

王天驰¹, 王海洋², 黄涛², 李俊娜³, 吴刚², 谢霖焱², 陈伟², 杜应超¹

(1. 清华大学 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024; 3. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 研究了一种自触发紫外预电离开关击穿时延抖动特性的影响因素, 结果表明: 触发间隙电容放电阶段起预电离作用时, 预电离注入时刻开关电场是开关时延抖动的决定性因素, 提高工作系数和采用逸出功更低的电极材料对降低开关在脉冲峰值附近击穿时的时延抖动效果有限。提出的改进方法为: 减小开关均压电阻阻值, 显著延长触发间隙的有效燃弧时间, 消除预电离注入时间及抖动的影响。采用改进方法时可以使开关在工作电压 300~800 kV、前沿 100 ns、180 ns 的脉冲峰值附近击穿时的时延抖动分别小于 1.3 ns、2.8 ns。

关键词: 气体开关; 预电离; 自触发; 脉冲击穿时延; 抖动

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210459

Influence factors of the pulsed breakdown time delay jitter of a self-triggered UV-illuminated switch and an improvement method

Wang Tianchi¹, Wang Haiyang², Huang Tao², Li Junna³, Wu Gang², Xie Linshen², Chen Wei², Du Yingchao¹

(1. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Influence factors of the breakdown delay jitter of a self-triggered UV-illuminated switch are studied. It indicates that the switch electric field at the injection time of pre-ionization is the decisive factor of the time jitter when the capacitor discharge stage of the trigger gap works. Increasing the operating coefficient and using electrode material with lower working function cannot remarkably reduce the time jitter when the switch breaks down near the peak time. The improvement method is to reduce the value of parallel resistors, which can extend the duration of sufficient arcing of the trigger gap and eliminate the influence of pre-ionization injection time and its jitter. By adapting this method, the time jitter is less than 1.3 ns or 2.8 ns under a pulse rise time of 100 ns or 180 ns when the operating voltage is 300–800 kV.

Key words: gas switch, pre-ionization, self-triggering, pulsed breakdown time delay, jitter

大型电磁脉冲(EMP)模拟器^[1]通常需要一至二级压缩电路将初级源的能量转化为前沿 2~5 ns、持续时间几十至百 ns 的电磁辐射^[2]。由于装置移动性和驱动源双极性加载的需求^[3-4], 装置中的 MV 级中储开关一般采用自触发紫外预电离气体开关^[5-6]。自触发预电离开关通常由触发间隙和开关主间隙构成, 触发间隙在特定时间击穿后, 火花放电辐射的光子照射开关阴极产生光电子, 减小了开关统计时延及抖动, 其低抖动运行一般通过试验调整主间隙与触发间隙之间的分压比来实现^[7]。但由于触发间隙与主间隙的击穿特性难以在全工作气压范围配合, 使得特定分压比下很难实现全工作范围的低抖动运行; 同时初级源参数的变化也会导致开关工作脉冲前沿、等效频率和实际分压比的变化。为了拓展减小自触发开关脉冲击穿时延和抖动的方法, 并提高开关抖动特性可预测性, 本文研究了触发时刻、脉冲前沿、工作系数、电极材料、预电离持续时间等因素对开关时延抖动特性的影响, 提出了

* 收稿日期: 2021-10-31; 修订日期: 2021-12-26
联系方式: 王天驰, wtc18@mails.tsinghua.edu.cn。
通信作者: 陈伟, chenwei6802@163.com。

一种开关低抖动运行方法,使得开关在前沿 100 ns、180 ns 的脉冲峰值附近击穿、工作电压 300~800 kV 时的击穿时延抖动均分别小于 1.3 ns、2.8 ns。

1 实验平台与实验设计

1.1 开关结构

自触发紫外预电离开关由触发间隙和主间隙构成,其结构如图 1 所示。触发间隙通过开关间隙并联电阻 R 和 R_{tr} 分得开关上的一部分电压。在开关上施加脉冲电压时,调节分压电阻阻值,使得触发间隙先于主间隙击穿,触发间隙放电电流产生的紫外光照射阴极产生初始电子,起到预电离作用。开关的工作介质为氮气。

1.2 实验平台与实验方法

图 2 给出了开关实验平台的等效电路,其中 C_{Marx} 、 L_{Marx} 、 R_{Marx} 、 S_{Marx} 分别是等效的 Marx 发生器电容、电感、杂散电阻、开关。实验中,我们采用了两种不同参数的 Marx 发生器,使得开关上加载的脉冲前沿(0~100%)分别约为 100 ns 或 180 ns。 $C_{Transfer}$ 、 $L_{Transfer}$ 分别是中间储能电容器、中间储能段电感,其值分别为 300 pF 和 2.5 μ H。 R_{Load} 是负载电阻,其值为 60 Ω 。

图 3 给出了主要实验波形与判读标准。其中,开关电流由串联在负载电阻后的小电阻测得,中储电压(即预电离开关击穿之前的电压)由中储电容器充电电流积分获得。由于平台电路结构的限制,无法仅通过击穿电压波形判读脉冲冲击时延,且由于自触发时间无法通过电学手段直接测量,因此定义开关击穿时延为开关电压 10% 峰值至开关击穿电流 10% 峰值的时间。开关击穿时延抖动定义为开关击穿时延数据的标准差。开关击穿电压取中储电压的峰值。开关击穿电压的分散性为击穿电压数据的标准差与平均击穿电压之比。实验前,先使用无水酒精擦拭电极,并进行了 200 发老练。实验时,每个状态进行 50 次试验,选取有效数据进行处理。

2 实验结果

2.1 预电离注入时间的影响

预电离注入时间可以通过改变图 1 中 R_{tr} 的阻值,即改变开关主间隙与触发间隙之间的分压比实现,而 $R=49$ k Ω 固定不变。表 1 至表 3 对比了在 100 ns 脉冲前沿下改变分压比时开关在脉冲峰值附近击穿时的特性数据,可以看出,预电离注入时刻对开关击穿时延抖动具有显著影响。去除 R_{tr} (即使得触发间隙用其结构容抗分压)和 $R_{tr}=4.5$ k Ω 时,触发间隙分压较高,会在较早时刻击穿,由于此时主间隙内电场并不足够高,因此,预电离产生的初始电子并不一定能够立即引起击穿。这两种状态下的脉冲前沿击穿时延抖动分别在 2~13 ns 和 2~7 ns 之间。 $R_{tr}=2.2$ k Ω 时,触发间隙会在主间隙电场达到较高值时击穿,因此初始电子产生之后可能会立即引起击穿,因此这种状态下的预电离效果较好,击穿时延抖动在 0.1~0.7 MPa 气压范围内小于 2.5 ns。

比较开关的击穿电压与前沿击穿百分比可以看出,预电离过早注入时,开关存在的一定的概率在脉冲后沿击穿或不击穿,这会对中储电容器绝缘造成较大威胁。 $R_{tr}=2.2$ k Ω 时,预电离效果最好,平均击穿电压最低。这种参数下的预电离开关在工作电压 200~800 kV 时的击穿时延抖动小于 2.5 ns,在工作电压 400~800 kV 时的击穿时延

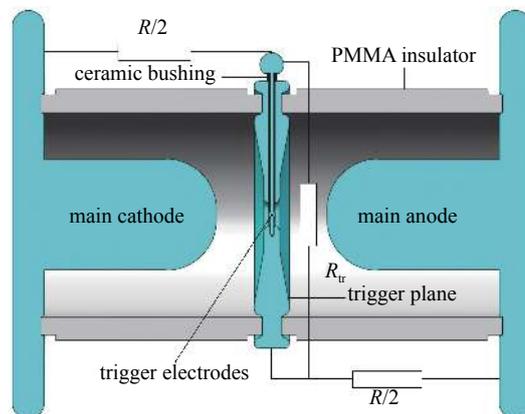


Fig. 1 The structure of the self-triggered pre-ionized switch

图 1 自触发预电离开关结构

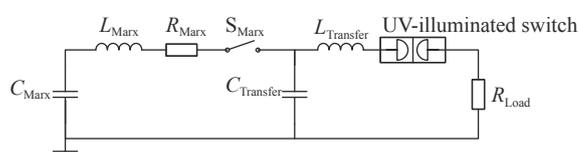


Fig. 2 An equivalent circuit of the experimental platform

图 2 实验平台等效电路

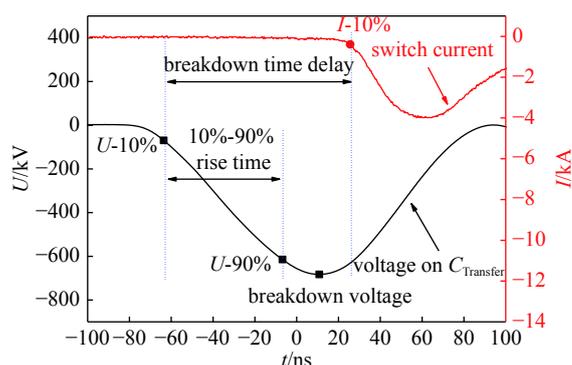


Fig. 3 Experimental waveforms and reading criteria

图 3 实验波形及判读标准

表 1 开关击穿特性数据 ($R=49\text{ k}\Omega$, 去除 R_{tr})

Table 1 Breakdown characteristics of the switch ($R=49\text{ k}\Omega$, R_{tr} removed)

p/MPa	mean breakdown time delay \bar{t}_d/ns	breakdown time delay jitter t_j/ns	mean breakdown voltage \bar{U}_b/kV	percentage of front edge breakdown/%
0.1	83.6	13.2	249.7	52.6
0.2	81.1	7.7	365.5	70.0
0.3	99.9	9.0	485.0	
0.4	99.3	3.3	513.1	
0.5	96.9	2.5	617.1	100
0.6	96.2	3.2	703.3	
0.7	97.5	3.5	794.4	

表 2 开关击穿特性数据 ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=4.5\text{ k}\Omega$)

Table 2 Breakdown characteristics of the switch ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=4.5\text{ k}\Omega$)

p/MPa	mean breakdown time delay \bar{t}_d/ns	breakdown time delay jitter t_j/ns	mean breakdown voltage \bar{U}_b/kV	percentage of front edge breakdown/%
0.1	72.6	4.9	271.9	100
0.2	88.3	5.8	358.2	
0.3	95.5	6.8	459.6	88.0
0.4	98.0	3.9	553.1	98.0
0.5	92.3	3.1	663.1	94.0
0.6	95.5	2.1	755.8	100
0.7	99.0	2.4	839.0	

表 3 开关击穿特性数据 ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$)

Table 3 Breakdown characteristics of the switch ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$)

p/MPa	mean breakdown time delay \bar{t}_d/ns	breakdown time delay jitter t_j/ns	mean breakdown voltage \bar{U}_b/kV	percentage of front edge breakdown/%
0.1	99.4	2.5	193.2	
0.2	99.5	2.0	311.3	
0.3	99.1	0.9	423.9	
0.4	101.2	1.2	519.2	100
0.5	100.2	1.0	630.8	
0.6	100.2	1.6	717.9	
0.7	99.1	1.6	804.7	

抖动小于 1.6 ns。

需要特别注意的是,改变分压比不仅会改变预电离的注入时刻,还会同时改变触发间隙的击穿时延抖动^[8]。一般来说,触发间隙上分压越高,其击穿时延抖动会越小,因此去除 R_{tr} 、 $R_{tr}=4.5\text{ k}\Omega$ 、 $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$ 时触发间隙的击穿时延抖动会相继增大,但为保证预电离与电场的有效配合,仍需采用 $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$ 。因此采用控制预电离注入时刻的方法降低开关击穿时延抖动存在着一定的固有缺陷。

2.2 脉冲前沿的影响

为分析脉冲前沿对开关时延抖动特性的影响,固定在 100 ns 前沿脉冲下获得较低抖动的参数 $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$, 更换初级源 Marx 发生器使得开关上的脉冲前沿增加至 180 ns, 对此种情况开关在脉冲峰值附近击穿时的击穿时延抖动特性进行了研究。由于 Marx 发生器建立电压的限制, 180 ns 前沿下仅对 0.4~0.7 MPa 下开关特性进行测试。表 4 和表 5 对比了改变脉冲前沿时开关的击穿时延和电压特性, 可以看出, 180 ns 前沿下开关击穿时延抖动在 5~8 ns 之间, 远大于 100 ns 前沿时的 1~2.5 ns 之间。因此可以看出, 虽然特定的分压参数可以在 100 ns 前沿脉冲下降低开关抖动, 但增加脉冲前沿时, 预电离的效果可能会大幅降低。

对比两种脉冲前沿下开关击穿电压及分散性可以看到, 脉冲前沿对开关平均击穿电压有一定的影响, 100 ns

表 4 开关击穿特性数据 ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$, 脉冲前沿 100 ns)Table 4 Breakdown characteristics of the switch ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$, pulse rise time=100 ns)

p/MPa	mean breakdown time delay \bar{t}_d/ns	breakdown time delay jitter t_j/ns	mean breakdown voltage \bar{U}_b/kV	breakdown voltage jitter/%
0.4	101.2	1.2	519.2	0.47
0.5	100.2	1.0	630.8	0.36
0.6	100.2	1.6	717.9	0.42
0.7	99.1	1.6	804.7	0.35

表 5 开关击穿特性数据 ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$, 脉冲前沿 180 ns)Table 5 Breakdown characteristics of the switch ($R=49\text{ k}\Omega$, $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$, pulse rise time=180 ns)

p/MPa	mean breakdown time delay \bar{t}_d/ns	breakdown time delay jitter t_j/ns	mean breakdown voltage \bar{U}_b/kV	breakdown voltage jitter/%
0.4	169.0	7.1	505.0	0.84
0.5	169.7	5.7	603.9	0.54
0.6	169.2	7.8	708.9	0.52
0.7	169.4	5.3	780.2	0.66

前沿下开关击穿电压会略高于 180 ns 下的击穿电压。由于控制了 Marx 发生器的充电电压使开关在脉冲峰值附近击穿, 改变脉冲前沿时开关击穿电压分散性均小于 1.5%, 气压 0.4~0.7 MPa 时 100 ns 前沿下的击穿电压分散性仍要略小于 180 ns 前沿情况。

2.3 工作系数的影响

为了研究工作系数对开关击穿特性的影响, 在 180 ns 脉冲前沿条件下改变 Marx 发生器充电电压, 使开关在不同的过压倍数下击穿。其中, 静态击穿电压对比基准由不均匀场下流注判据公式计算^[9]。

图 4 给出了不同工作系数下击穿时延及抖动的变化规律。可以看出, 随着工作系数的提高, 虽然未实现预电离参数的最优配置, 击穿时延抖动也可以显著减小。气压 0.4~0.7 MPa 时, 工作系数大于 1.06 时即可使得开关击穿时延抖动小于 2 ns, 远低于峰值附近击穿时的 5~8 ns。但是也可以发现, 提高工作系数会使开关击穿时延显著降低。工作系数由约 1 提高至约 1.05 时, 击穿时延从约 170 ns 减小至约 130 ns, 即开关在脉冲前沿约 80% 时刻就已击穿。这种情况虽然可以获得较小的时延抖动, 但应用至实际的 EMP 模拟器装置中时可能会导致负载输出波形的畸变。事实上, 如果触发间隙自身的抖动可以小到忽略不计, 或许可以采用提高工作系数、延后触发间隙击穿时刻(预电离注入时刻)的方式来实现开关在峰值附近击穿时的低击穿特性。但是由于本文中自触发开关的触发间隙工作在自击穿模式下, 其击穿时延抖动与开关击穿时延抖动量级相当、不可忽略^[8], 因此必须避免调整分压比、延后其击穿时刻导致触发间隙在主间隙峰值之后击穿、引起更大抖动, 所以采用提高工作系数的方法降低开关击穿时延抖动在自触发开关中并不完全可取。

2.4 电极材料的影响

由于预电离通过紫外光照射阴极产生初始电子, 初始电子产生率与阴极材料的性质有重要关系。为研究初始电子产生率对开关击穿时延抖动特性的影响, 在 180 ns 前沿脉冲和 $R_{tr}=2.2\text{ k}\Omega$ 条件下, 分别选用不锈钢和石墨作为开关电极材料。不锈钢的逸出功约为 4.5 eV, 石墨的逸出功约为 4.3 eV, 因此, 在同样强度的紫外光照射下, 石墨阴极应会产生更多的初始电子, 从而可能改善预电离的效果。

图 5 给出了输入脉冲波形相同时, 采用不同电极材料的开关的击穿时延及抖动。这种条件下, 触发间隙应具有相同的击穿特性。可以看出, 由于初始电子数量的增加, 尽管触发间隙与主间隙的配合参数并非最优, 但使用石

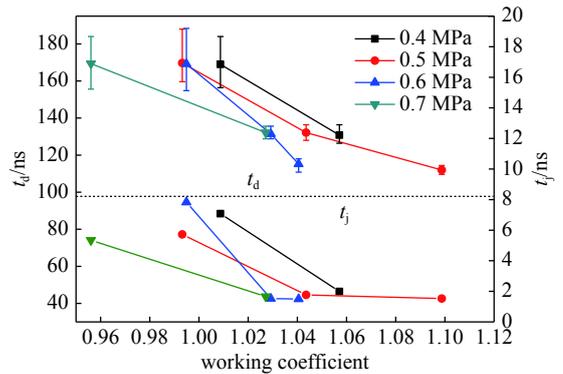


Fig. 4 Breakdown time delay and jitter under different working coefficient

图 4 不同工作系数下的开关击穿时延及抖动

墨作为电极材料时的击穿时延抖动在 2~4 ns, 相较使用不锈钢电极时的 5~8 ns 有明显减小。然而, 采用石墨电极时不仅抖动有明显降低, 击穿时延也从约 170 ns 减小到约 130 ns。造成这种现象的原因可能是: (1) 石墨材料自身的强场发射阈值更低, 初始有效电子的产生时刻可能早于预电离注入时刻, 而预电离的作用是加快了流注的发展过程^[10]; (2) 紫外光照射石墨阴极产生数量更多的初始电子, 缩短了电子崩达到临界状态的时间。

图 6 和图 7 给出了采用石墨电极和不锈钢电极、开关在脉冲峰值附近击穿时的时延和电压特性。可以看到, 采用石墨电极时, 开关击穿时延仍从约 170 ns 减小到约 150 ns, 击穿时延抖动降低到 3~5 ns, 击穿电压也降低了约 10%。但由于工作电压降低, 石墨电极开关击穿电压的分散性相较不锈钢电极有所增大, 但是仍基本小于 1%。

由于控制输入脉冲波形相同(即触发间隙击穿特性相同)时, 采用石墨电极的开关可在脉冲前沿以较低抖动稳定击穿, 这并不符合峰值稳定击穿的需求; 控制开关在脉冲峰值击穿时, 采用石墨电极的开关的击穿时延抖动虽可降低到 3~5 ns, 但考虑到脉冲前沿仅比 100 ns 增加了不到 1 倍, 而最大开关抖动(5 ns)则比前沿 100 ns 时的最大开关抖动(1.6 ns)增加了约 2 倍, 因此工作特性仍然较差。因此, 采用低逸出功的电极材料石墨可以一定程度减小开关的抖动, 但并不能够改变预电离注入特性并使得开关在脉冲峰值附近稳定击穿。

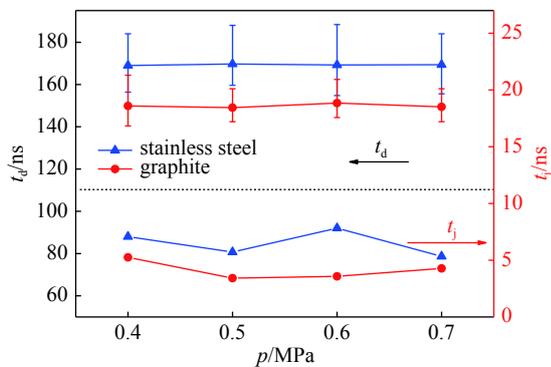


Fig. 6 Influence of electrode material on the breakdown time delay and jitter under the peak-time breakdown case
图 6 峰值击穿时电极材料对击穿时延及抖动的影响

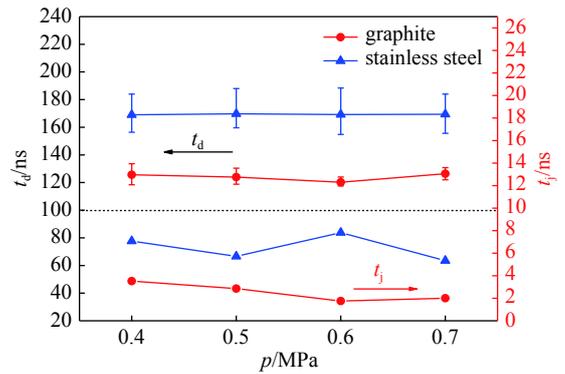


Fig. 5 Influence of electrode material on the breakdown time delay and jitter under the same input pulse waveform
图 5 脉冲波形相同时电极材料对击穿时延及抖动的影响

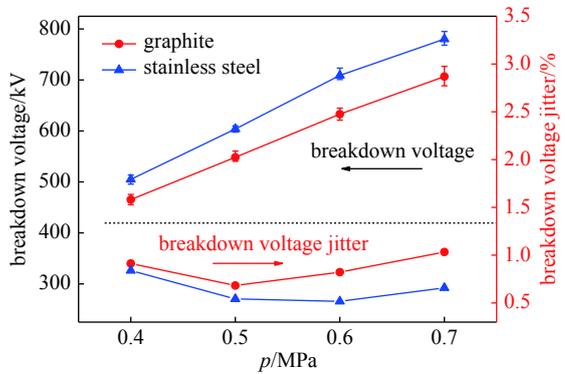


Fig. 7 Influence of electrode material on the breakdown voltage and jitter under the peak-time breakdown case
图 7 峰值击穿时电极材料对击穿电压及分散性的影响

2.5 触发间隙有效燃弧时间的影响

通过表 1 至表 3 的实验结果可以看出, 如主间隙采用大阻值电阻均压, 因为主间隙均压电阻限制触发间隙击穿后的放电电流, 而光脉冲持续时间仅取决于触发间隙等效电容, 由于其半宽仅约 10 ns, 因此预电离注入时刻始终是一个极端重要的影响参数。此外, 自触发预电离间隙本身也存在击穿抖动^[8]。为了延长触发间隙的有效燃弧时间, 我们将主间隙均压电阻阻值缩小一个数量级进行电路仿真和实验验证。

图 8 给出了主间隙均压电阻为 49 kΩ 和 3.2 kΩ 时触发间隙放电电流模拟结果。可以看出, 触发间隙击穿后首先为一电容放电阶段, 该阶段电流波形主要取决于触发间隙等效电容及其击穿电压。主间隙采用大阻值均压电阻时, 放电电流半宽约 10 ns, 后沿电流的幅值极小。而主间隙采用小阻值均压电阻时, 触发间隙电容放电阶段结束后由开关泄漏电流驱动的持续燃弧阶段十分明显, 该阶段放电电流主要取决于开关上施加的电压。因为火花放电的光辐射强度基本取决

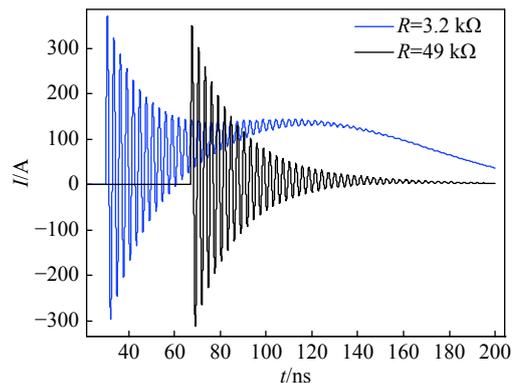


Fig. 8 Influence of parallel resistor on the discharge current of trigger gap

图 8 分压电阻阻值对触发间隙放电电流的影响

于放电电流^[4],可以推断此时光脉冲后沿仍具有相当的幅值,可以照射阴极产生初始有效电子。因此,此时触发间隙击穿时刻实际上应被定义为预电离子开始注入的时刻。此外,由于此时触发间隙上分得非常高的电压,其击穿时延抖动也会减小。事实上,由于此时光脉冲后沿起到预电离的作用,触发间隙击穿时延抖动的影响将会大大降低。

图9和图10给出了主间隙均压电阻 $R=3.2\text{ k}\Omega$, R_{tr} 去除时开关在100 ns和180 ns前沿下的峰值击穿时延和电压特性。可以看到,脉冲前沿100 ns时,开关在200~800 kV工作电压时的时延抖动在0.6~1.3 ns之间,电压分散性在0.4%~0.7%之间;脉冲前沿180 ns时,开关在约300~750 kV工作电压时的时延抖动在1.7~2.8 ns之间,电压分散性在0.8%~1.1%之间。实验结果基本验证了延长触发间隙有效燃弧时间对预电离效果改进的有效性。

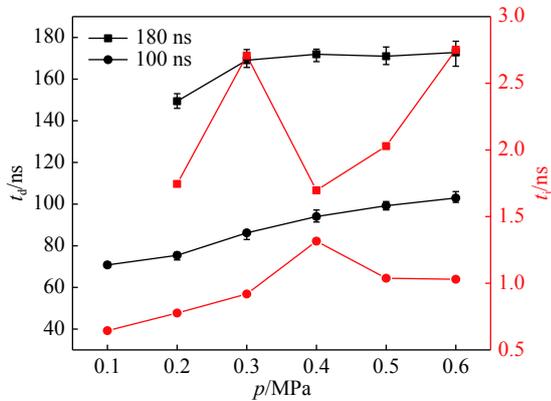


Fig. 9 Breakdown time delay and jitter with a continuously arcing trigger gap under different pulse rise time

图9 触发间隙持续燃弧时不同脉冲前沿下的击穿时延及抖动

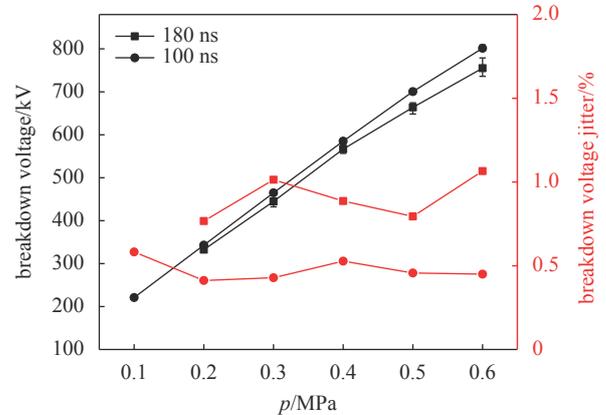


Fig. 10 Breakdown voltage and jitter with a continuously arcing trigger gap under different pulse rise time

图10 触发间隙持续燃弧时不同脉冲前沿下的击穿电压及分散性

需要注意的是,由于图9纵坐标的尺度原因,因此击穿时延抖动似乎在0.4 MPa处存在拐点,但是实际上脉冲前沿180 ns、100 ns时,不同气压下抖动的极差仅约1.1 ns、0.7 ns。对比表4和表5中给出的不同气压下的时延抖动差异,可以看出该状态下脉冲前沿180 ns、100 ns时,不同气压下抖动的极差在2.1 ns、0.6 ns,实际比图9中抖动极差更大,但由于其抖动绝对值本身较大,掩盖了这种差别。抖动存在差别的原因可能是不同气压下的控制条件为开关在脉冲峰值附近击穿,由于开关电场、预电离光强度等因素均在变化,这种击穿状态下开关抖动随气压变化并无明显规律。

3 结 论

本文研究了自触发紫外预电离子开关脉冲击穿时延抖动特性的影响因素及改进方法,结果表明:(1)在限制开关均压电阻阻值、使得开关在百 ns 前沿脉冲峰值附近稳定击穿的条件下,预电离光脉冲主要取决于自触发间隙等效电容值和击穿电压,由于其持续时间在10 ns左右,预电离注入时间是影响开关时延抖动的十分关键的因素,在100 ns 脉冲前沿下采用特定分压参数可以使得200~800 kV工作电压和脉冲峰值附近击穿时的击穿时延抖动小于2.5 ns;应用需求希望开关在不同的脉冲前沿下都有较小的抖动,但在100 ns 脉冲下试验得到的较优分压参数在180 ns 前沿下被采用时则会使得开关击穿时延抖动增加到5~8 ns,说明应用这种方法时参数选取范围较窄,限制了开关的应用;(2)提高工作系数及初始电子产生速率可以一定程度减小开关击穿时延抖动,但仍无法替代预电离注入时刻参数的重要作用,且会导致开关在脉冲前沿处击穿,其会影响脉冲源负载上的波形质量;(3)为了延长触发间隙有效燃弧时间并消除预电离注入时间这一参数的影响,可以减小开关主间隙并联均压电阻阻值,使得触发间隙放电电流后沿仍保持一定的幅值并产生初始有效电子,这种情况下开关在前沿100 ns、180 ns 脉冲下的峰值击穿时延抖动可以分别小于1.3 ns、2.8 ns,相较结论(1)中采用触发间隙电容放电阶段预电离子开关主间隙具有更优的特性和更宽的应用条件。

参考文献:

- [1] 冯寒亮,刘逸飞,刘峰.美国海军全舰电磁脉冲模拟器发展综述[J].中国舰船研究,2020,15(5):69-78.(Feng Hanliang, Liu Yifei, Liu Feng. An overview on the development of the U. S. navy full ship electromagnetic pulse simulators[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 69-78)
- [2] 谢彦召,王赞基,王群书,等.高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J].强激光与粒子束,2003,15(8):781-787.(Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787)

- [3] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2554-2558.
- [4] 王天驰, 陈伟, 王海洋, 等. 双极性加载脉冲源中储开关同步击穿特性[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3387-3395. (Wang Tianchi, Chen Wei, Wang Haiyang, et al. Synchronous breakdown characteristic of transfer switches in a bipolar pulse generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3387-3395)
- [5] Li Junna, Jia Wei, Tang Junping, et al. A 3-MV low-jitter UV-illumination switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(2): 360-364.
- [6] Naff J T. Spark gaps for EMP and SREMP pulsers[C]//Proceedings of 2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 322-331.
- [7] Li Junna, Chen Weiqing, Chen Zhiqiang, et al. Influences of electric field on the jitter of ultraviolet-illuminated switch under pulsed voltages[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 033509.
- [8] Wang Tianchi, Wang Haiyang, Chen Wei, et al. A calculation model for breakdown time delay and jitter of gas switches under hundred-nanosecond pulses and its application in a self-triggered pre-ionized switch[J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23: 115507.
- [9] Lehr J, Ron P. Foundations of pulsed power technology[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] Bradley L P. Preionization control of streamer propagation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(3): 886-890.
- [11] Flowers J W. The channel of the spark discharge[J]. *Physical Review*, 1943, 64(7/8): 225-235.