

常压下重频纳秒脉冲气体放电试验研究

邵涛^{1,2}, 袁伟群¹, 孙广生¹, 严萍¹, 王珏¹, 高巍^{1,2}, 张适昌¹,
苏建仓³, 俞建国³

(1. 中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京市石景区 100039;
3. 西北核技术研究所, 陕西省西安市 710049)

EXPERIMENTAL STUDY OF REPETITIVELY NANOSECOND-PULSE BREAKDOWN IN ATMOSPHERIC AIR

SHAO Tao^{1,2}, YUAN Wei-qun¹, SUN Guang-sheng¹, YAN Ping¹, WANG Jue¹, GAO Wei^{1,2},
ZHANG Shi-chang¹, SU Jian-cang³, YU Jian-guo³

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Shijingshan District, Beijing 100039, China;
3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xian 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Insulating research of gas breakdown with nanosecond pulse is one applicable base of pulsed power technology. Used the nanosecond SOS-based pulse generator SPG200, breakdown characteristics of parallel-plate air gaps were investigated in an atmospheric pressure with single pulse and repetitive burst conditions (1, 10, 100, 500, 1000Hz), under variant applied pulsed voltage (60, 80, 100kV) and diverse gap distances (5, 10, 15, 20mm) respectively. Parameters such as applied pulsed voltage, breakdown current, observational breakdown delays and repetitively stressing time are obtained. Experimental results showed that the breakdown electric field of repetitive burst is much lower than that of single pulse. The observational breakdown delays and repetitively stressing times are gradually reduced with the increasing electrical field, whose distinctions seem to be big under lower PRF (pulse repetition frequencies), but more small and adjacent at higher PRF. Compared with relatively slim discrimination of low PRF bursts and single pulse, the discharge process under higher PRF bursts is different. Finally, some discussions are used to explain the breakdown delay time and gas-breakdown development process of nanosecond discharges.

KEY WORDS: High voltage engineering; Gas breakdown; Repetitive nanosecond bursts; Observational breakdown delay; Repetitively stressing times

摘要: 气体介质在重频 (PRF) 纳秒脉冲作用下的绝缘特性是高重频脉冲功率技术研发的基础。采用 SPG200 重频纳秒脉冲电源, 通过测量常压空气介质间隙 (5、10、15、20mm), 在不同重复频率 (1、10、100、500、1000Hz)、不同电压幅值 (60、80、100kV) 作用下的击穿电压、电流、击穿延时及耐受时间, 研究了空气的绝缘特性。结果显示重频脉冲常压下空气的击穿场强比单次脉冲时低得多; 随击穿场强的增大, 击穿时延、重频耐受时间均有减小的趋势, 高 PRF 时减小趋缓。低 PRF 下的放电发展过程与单次时的放电发展过程差别不大, 而与高 PRF 下的不同。最后对纳秒脉冲下击穿时延及放电机理等进行了一些讨论。

关键词: 高电压技术; 气体放电; 重频纳秒脉冲; 击穿时延; 重频耐受时间

1 引言

由于高功率微波、高功率激光、高功率粒子束等在国民经济和国防建设中应用的需求牵引, 脉冲功率技术正在向高能量、高平均功率、高重复频率等方向发展。重频脉冲功率技术已成为高电压技术学科发展的前沿。气体介质在重频纳秒脉冲作用下的绝缘特性是高重频脉冲功率技术研究开发的基础。

气体介质在直流、工频交流和冲击电压 (微秒级上升沿和脉宽) 下的闪络、击穿等特性, 多年来已经进行了相当的研究^[1-5]。而在纳秒级脉冲电压下的研究相对较少。纳秒脉冲下气体放电的研究成

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50207011); 国家自然科学基金重点项目 (50437020)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50207011).

果,多是单次试验的结果及一些基于试验结果提出的纳秒级脉冲下的放电机理假说^[6-12]。如较早的R.C. Fletcher用单一电子崩主导放电的机理向多电子崩机理的转变来解释放电机理,其试验结果符合经典流注机理^[6]; P. Felsenthal 和J. M. Proud提出用一种改进的脉冲微波(pulsed-microwave)气体击穿理论来解释击穿机理^[7]; 前苏联的G.A. Mesyats 等进一步总结了纳秒脉冲下由少量和大量初始电子引燃的气体放电特征,用基于逃逸电子(runaway electron)的线性电子崩链理论来解释放电机理^[8]; E.E. Kunhardt等提出了一种适合于高压、高过电压的逃逸电子模型^[9]; Y. Kawada等试验得到纳秒脉冲下Paschen曲线,并利用经典的电子崩一流注机理来解释放电机理,流注起始于阴极表面及表面附近^[10],等等。虽然有一些的试验结果及放电机理假说的提出,但到目前为止还没有一种假说能较好地解释所有的试验现象。因此大量的研究仍在继续。笔者开展了重频纳秒脉冲气体放电的试验研究。采用SPG200重频纳秒脉冲电源^[13],常压空气介质间隙在不同PRF、不同电压幅值作用下的击穿电压、电流;击穿延时及耐受时间,研究重频纳秒脉冲作用下的绝缘特性。

2 试验装置和方法

2.1 试验装置

试验装置主要包括重频脉冲源、试验腔、测量系统等,试验装置及测量系统示意图见图1。试验源SPG200是一种基于SOS开关^[14]的全固态高重复频率脉冲功率源,最高输出电压为200kV,上升沿约10ns,峰值半宽高(FWHM)约20~30ns。输出脉冲的频率由触发脉冲发生器调节最高可达2kHz,而在300Hz以下可长期运行,超过300Hz只能爆发式运行。输出电压由负载调节,在放电回路并联循环盐水,通过调节盐水浓度来确定输出电压。为在油浸式的SPG200中安放试验腔,设计的外观如图2所示。试验电极表面为表面抛光的圆盘铜电极,直径6cm,间隙长度D靠旋转高压电极螺杆调节。

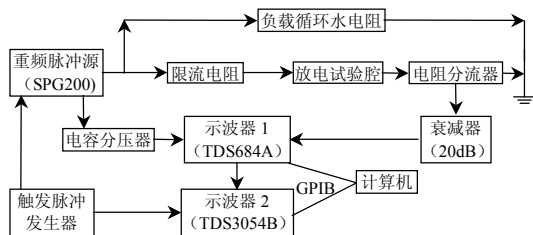


图1 试验装置及测量系统示意图
Fig.1 Experimental setup arrangement



图2 放电试验腔外观图

Fig.2 Outside sketch of discharge container

2.2 信号测量系统

信号测量系统如图1所示,测量参数主要有施加电压、放电电流、重频耐受时间。电压信号由贴片电容分压器测量,其分压比约4780。电流信号测量则由同轴超高频氧化膜电阻分流器和衰减器构成。电阻分流器阻值0.2Ω,示波器1(TDS684A:带宽1GHz,采样率5GS/s)的通道1、2分别采样电流信号和电压信号后通过GPIB接口通讯送入计算机保存。图3是PRF=10Hz,间隙未被击穿时,90s内记录的约1000个脉冲电压波形包络线,除去在峰值处有毛刺,上升沿、峰值等重复性较好,说明SPG200性能稳定,输出电压幅值抖动一般小于3%。重频脉冲下,气体间隙通常不会在第一个脉冲击穿。通过设定示波器1电流信号通道触发值,由电流信号触发同时得到击穿时的电压电流波形,如图4(a)所示。

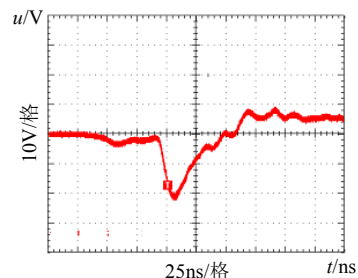


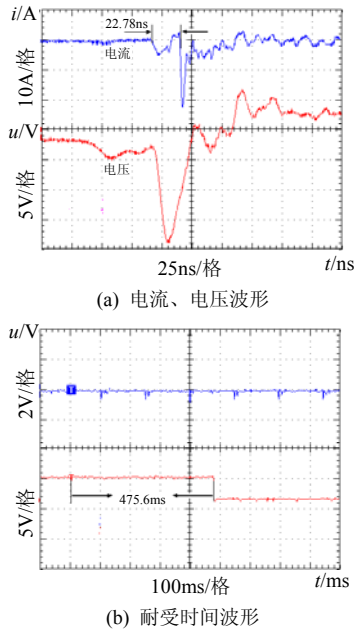
图3 重频下电压波形包络线(1004个)

Fig.3 Incident voltage envelope of repetitive burst condition(1004 shots)

通常击穿时延 τ 可以通过电压击穿波形^[6-7],电流击穿波形读取^[15],也可以由电压电流击穿波形联合读取^[10]。本试验中为保证SPG200的安全运行,在放电回路串联了大功率限流电阻,所以在当间隙击穿时,由电容分压器读取的电压波形与真实击穿波形

有些差别，电阻分流器实时记录了间隙上电流的变化，因此选取电流击穿波形来得到击穿时延。与文献[15]中相同，取平板电极上的位移电流的初始过零点至击穿电流起始过零点之间的时间为击穿时延 τ 。

图 4(a)电流波形中 22.78ns 即为此次试验的 τ 值。



注： $D=10\text{mm}$ ， $\text{PRF}=100\text{Hz}$ ， $P=1\text{atm}$ 。

图 4 电流、电压波形及耐受时间示意图
Fig.4 Waveforms of discharge current, voltage and sketch of repetitively stressing times

与单次纳秒脉冲下击穿时延不同，重频条件下施加电压一段时间后才击穿，时间可能达到几十秒。测量重频耐受时间，可以推断间隙是在施加电压后的第几个脉冲下击穿。重频耐受时间 T 由两台示波器联合测量得到。先设置示波器 2 (TDS3054B) 一定的扫描时间，在启动触发脉冲发生器触发 SPG200 输出重频脉冲电压时，同步给示波器 2 扫描记录起始信号。当间隙击穿时，放电电流触发示波器 2 记录电压电流信号时同步输出一个约 4V 的低电平，作为耐受时间终止信号。耐受时间测量示意图如图 4(b)所示， $T=0.476\text{s}$ ，间隙是在施加脉冲后约第 48 脉冲后击穿。

2.3 试验方法

在平板电极中，气压 $p=101.325\text{kPa}$ ， D 取 5, 10, 15, 20mm，施加电压 U 分别约 60, 80, 100kV，重复频率 (PRF) 取 1, 10, 100, 500, 1000Hz。根据 SPG200 的输出特性对不同 PRF 分别预置示波器 2 一定的扫描时间，PRF 为 1Hz, 10Hz 时扫描约 90s, 100Hz 时 36s, 0.5 kHz, 1kHz 时 18s。每个测量点重复进行试验 10 次。确定一个间隙及施加电压

幅值，首先进行单次脉冲下试验，先做 5 次，如未击穿次数小于 3 次，重复进行 5 次试验；否则调整重复频率进行重频击穿试验。重频试验一般先选取 100Hz，方法同上。根据其试验结果决定 1Hz, 10Hz 的试验是否继续。调整间隙及施加电压重复上述试验，此外在每次间隙放电后对试验腔换气清洗。

整个试验过程中，通过信号测量系统 (TDS 示波器、GPIB 数据转接卡及计算机) 记录每次试验电压、电流波形及重频耐受时间。

3 试验结果与分析

3.1 重频条件下击穿概率分布

击穿与施加电压幅值、间隙长度、重复频率、SPG200 运行时间 (等于示波器 2 的扫描时间) 均相关。不同 PRF 下的重频耐受时间不同，便于比较，将重频耐受时间限定 $<10\text{s}$ ，统计得到不同电压下的重频击穿概率分布如图 5 所示 ($f=0$ 代表单次脉冲)。由于气体击穿存在必然的随机性，确定击穿场强方法各异，本试验中击穿场强定义为击穿概率大于 50% 的最小施加场强，结果如表 1 所示。

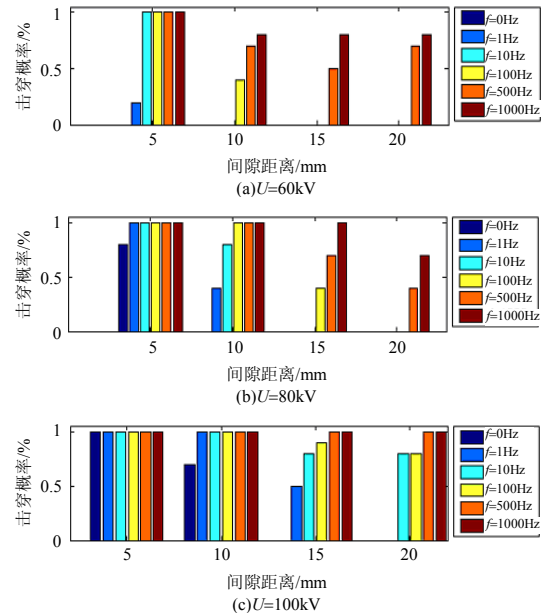


图 5 重频耐受时间 $<10\text{s}$ 时击穿概率分布
Fig.5 Histograms of breakdown probability (repetitively stressing times $<10\text{s}$)

表 1 击穿场强 E 的试验结果
Tab.1 Experimental data for E

PRF/Hz	D/mm	$E/(\text{kV}/\text{cm})$	击穿概率/%
单次	10	100	70
1	10	66.7	50
10	15	66.7	80
100	15	53.3	50
500	20	30	70
1000	20	30	80

常压下,约10ns脉宽的脉冲下均匀场间隙的击穿场强约为同等条件下直流击穿场强(30kV/cm)的3倍^[6],这与本试验的单次脉冲试验结果接近。但在重频条件下,即使是重复频率为1Hz,击穿场强也要下降至约66.7kV/cm,但击穿需要耐受一定的时间。文献[10]介绍了类似的脉冲电压下(上升沿10.8ns,FWHM=30ns),常压下1cm气体间隙的50%击穿场强约70kV/cm,在较低的重频条件下击穿场强较接近间隙的50%击穿场强。在高重频条件下(PRF=0.5kHz、1kHz)下,气体间隙的击穿场强会急剧下降,30kV/cm的击穿场强下也可以稳定击穿,约为单次脉冲的1/3,已经与直流击穿场强相差无几。试验结果也与试验电极上的电场均匀程度有很大的关系。

3.2 施加场强与击穿时延关系

施加电压场强 E 与击穿时延 τ 的关系,如图6所示。无论单次脉冲,还是重频脉冲下, τ 均随 E 增大而减小。两者不同在于高 PRF (500、1000Hz) 时 τ 值小,且随 E 增大而减小的变化明显趋缓,单次和低 PRF 脉冲下 τ 较大,且随 E 的增大而减小的趋势近似线性。PRF=100Hz 的试验结果分散性较大。低 PRF 下放电发展过程可能与单次时的放电发展过程差别不大,而与高 PRF 有明显差别。

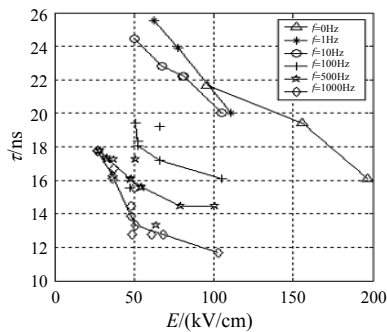


图6 重频脉冲下场强与击穿时延关系

Fig.6 E vs τ characteristics of different PRF

3.3 施加场强与重频耐受时间关系

图7所示为耐受时间 T 与施加场强 E 的关系曲线。 T 随着 E 的增大而减小,且逐渐平缓,趋近于0。不同的 PRF 对 T 的影响不同,当 PRF ≥ 10 Hz 时 T 一般在10s内,而1Hz下的耐受时间较长,可以认为在低重频条件下的击穿只是一个击穿概率的问题。100Hz的试验结果分散性较大,而500Hz与1kHz下的重频耐受时间相差无几。

重频耐受时间对于分析重频纳秒脉冲下气体放电的发展过程是很重要的。重频条件下的击穿是在伴随着能量的迁移和扩散以及达到击穿所需的

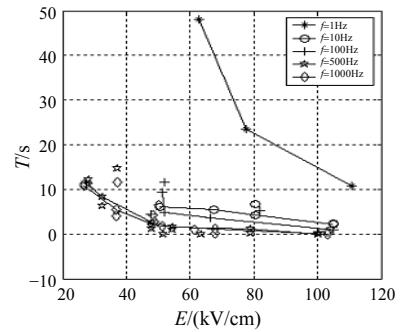


图7 重频脉冲下场强与耐受时间关系

Fig.7 E vs T characteristics of different PRF

脉冲能量逐步积累的过程,与施加的脉冲电压、重复频率、间隙、击穿脉冲个数等参数有关。

4 讨论与分析

4.1 重复频率对击穿时延的影响

在很高的施加场强,阴极未被照射的情况下,单次脉冲下击穿时延概率分布中最小的 τ 就是形成时延^[15]。Y. Kawada, 等在阴极被紫外线照射的情况下,常压单次脉冲下得到的击穿时延一般也是分布在10~20ns间,最小的 τ 约10ns^[10],这些结果与在阴极未被照射、重频脉冲条件等下得到的结果较为接近(见图6)。在高PRF下 τ 值的减小可以从两个方面来解释:①由于高重频导致间隙击穿的初始电子的出现统计特征已经大大减小;②大量初始电子的出现,由少量电子引燃的放电形成时延要大于大量初始电子引燃的放电形成时延^[8]。高重频重复脉冲施加过程中,间隙中处于激发态的受激粒子、空间电荷等已经使初始电子出现的统计时延大大减小,同时初始电子的数目大大增加。

击穿时延由统计时延和形成时延组成。统计时延是指施加电压到出现有效电子的时间,与间隙的初始电离强度或对它的照射强度有关。形成时延(t_f)是形成有效电子到间隙击穿的时间,由一次电子崩发展到临界的时间(有效空间电荷形成的时间)和流注发展时间组成,通常后者可以忽略^[1]。下面分析纳秒脉冲下电子崩发展到临界的时间(t_c)和流注发展时间(t_s)。

在 $40 < E/p < 140$ 范围内,由式(1)可以计算电离系数 α , 电子漂移速率 v_c 等^[10],其中 E : V/cm, p : Torr, v_c : cm/s, χ : cm。

$$\begin{cases} \alpha/p = 1.16 \times 10^{-4} \times (E/p - 28)^2 \\ v_c = 1.25 \times 10^7 \times \sqrt{E/40p} \end{cases} \quad (1)$$

经典流注判据如下:

$$\alpha\chi = k = 20 \quad (2)$$

$p=1\text{atm}$. 时由式(1)、(2)可计算得到一次电子崩发展的临界长度 χ 及 t_c , 其随 E 变化曲线如图 8 所示。可以看出 χ 及 t_c 开始随 E 增大急剧下降, 场强到一定程度时变化开始平缓, 其中 t_c 的值是几个纳秒甚至亚纳秒。以 1cm 间隙, $E=80\text{kV/cm}$ 时, $\alpha=238\text{cm}^{-1}$, $\chi=0.084\text{cm}$, $t_c=4.7\text{ns}$, 流注发展速度取 3mm/ns ^[10,17], $t_s=3\text{ns}$, 则 t_f 约 8ns , 这比本试验及文献[10]中得到的最小击穿时延小一些。在纳秒级脉冲高场强下, 如果经典流注机理解释放电过程有效, 则电子崩发展到临界长度所需的时间不再远大于流注发展所需时间, 而是与其所需时间接近, 场强更高时甚至更小。一次电子崩能很快达到临界状态, 必须有相当的时间来发展流注。

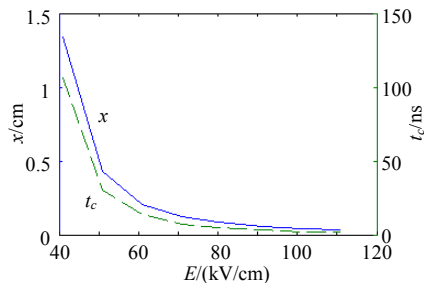


图 8 电子崩临界长度及时间与场强关系($p=1\text{atm}$.)

Fig.8 χ, t_c vs E characteristics ($p=1\text{atm}$.)

4.2 击穿机理的探讨

纳秒脉冲下放电机理假说主要有经典流注机理、电子崩链模型、逃逸电子模型等^[9,18]。几种假说都是建立在一次电子崩发展到临界后二次过程的不同发展模式上, 都注重空间电荷对放电过程的影响。经典流注机理认为空间光电离在流注机理中起着很重要的作用, 经典流注机理的二次过程诱因是空间电荷的光电离; 电子崩链模型考虑逃逸电子在一次电子崩的基础上形成二次电子崩, 形成电子崩链; 逃逸电子模型则主要考虑逃逸电子逃离主电子崩后主导一次电子崩的向前发展。电子崩链模型、逃逸电子模型中二次电子是由阴极附近的光电效应产生^[9]。由图 8, 在高场强下 t_c 是几个纳秒, 而且可以更小, 而经典流注机理中激发光子所需的时间通常是 $1\sim 10\text{ns}$ ^[8], 则二次电子崩及流注很难继续发展, 说明这时经典流注判据存在缺陷, 需要对式(2)在纳秒脉冲下的判据进行修正, 即要对 $\alpha\chi=k$ 中 k 值的修正; 或者经典流注机理中的空间光电离不是二次过程的主导因素, 需要一些二次过程来发展流注, 如一些基于逃逸电子的二次过程, 但这些模型目前还缺乏试验验证。纳秒脉冲下气体放电的

击穿过程可以分为以下三个过程:

(1) 临界电子崩的产生。在初始有效电子的出现后, 随着电子的指数倍增, 电子崩很快达到临界条件。在这一期间内, 单次脉冲和重频脉冲下的击穿存在较大差异。在重频条件下, 需要考虑击穿脉冲前的脉冲在间隙上残留的空间电荷及处于激发态的受激粒子, 其“累积效应”将大大加快临界电子崩的迅速发展。

(2) 临界电子崩向流注的发展。这也是目前关于纳秒脉冲下放电机理研究的重点。在纳秒级的高场强快脉冲下, 有利于产生高能量且能逃逸出电子崩的快电子, 这些快电子将是一次电子崩继续发展、二次电子崩产生的关键。因此, 认为在击穿时延小于几个纳秒下的放电将是基于逃逸电子主导的流注放电, 而不是经典流注所强调的空间光电离。能达到纳秒级击穿时延的击穿正是纳秒脉冲气体放电领域。

(3) 等离子通道的形成。随着电子崩逐步向流注的发展, 间隙上迅速形成了等离子体通道, 间隙击穿。

从放电发展来看, 单次脉冲和重频脉冲下击穿过程的不同主要在于放电过程中的第一步, 即重频条件下需要考虑前面脉冲残留空间电荷及受激粒子的“累积效应”。

5 结论

(1) 本试验条件下, 击穿场强远比单次脉冲的击穿场强低, 在高 PRF (500、1000Hz) 时的击穿场强甚至与直流击穿场强相差无几。

(2) 在不同 PRF 下, 击穿时延随着击穿场强的增大而减小的趋势是不一样的。高重频条件下, 击穿时延的减小会趋缓。低 PRF 下的放电发展过程可能与单次时的放电发展过程差别不大, 而与高 PRF 下的有明显差别。高 PRF 下的击穿时延减小是由于统计时延的减小及大量初始电子的出现导致的。

(3) 建立在重频击穿试验中重频耐受时间的概念。在不同 PRF 下, 重频耐受时间随击穿场强的增大而减小趋势不同。低 PRF 下的重频耐受时间较长, 其击穿可以看作是将单次脉冲下的击穿几率大大增加, 而高 PRF 条件下的重频耐受时间一般很短, 在 0.5kHz 和 1kHz 下重频耐受时间差别不大。

(4) 纳秒脉冲放电机理假说有经典流注机理、电子崩链模型、逃逸电子模型等。重频条件下的击

穿可能需要考虑前面脉冲留下的受激粒子、空间电荷等的累积效应。经典流注机理或者经典流注判据存在缺陷,需要修正;其他几种还缺乏很明确数学模型及理论,有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 王巨丰, 蒋德福, 唐兴祥. 激光诱导下间隙放电电压的估算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 62-66.
Wang Jufeng, Jiang Defu, Tang Xingzhuo. Calculation of flashover voltage triggered by laser-produced plasma[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 62-66.
- [3] 丁立健, 李成榕, 王景春, 等. 真空中绝缘子沿面预闪络现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 27-32.
Ding Lijian, Li Chengrong, Wang Jingchun *et al.* Study on pre-flashover of alumina insulator in vacuum[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 27-32.
- [4] 吕金壮, 李成榕, 丁立健, 等. 陷阱分布对 Al₂O₃ 陶瓷介质在真空中沿面闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 77-81.
Lu Jinzhuang, Li Chengrong, Ding Lijian *et al.* Influence of trap distribution on surface flashover of alumina ceramic[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 77-81.
- [5] 范建斌, 郑健超, 王来, 等. 雷电冲击电压下沿面闪络特性的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 13-16.
Fan Jianbin, Zheng Jianchao, Wang Lai *et al.* Flashover characteristic of along surface under lightning impulse voltage [J]. Power system technology, 2003, 27(2): 13-16.
- [6] Fletcher R C. Impulse Breakdown in the 10⁻⁹ Sec. range of air at atmospheric pressure [J]. Phys.Rev., 1949, 76(10): 1501-1511.
- [7] Felsenthal P, Proud J M. Nanosecond-pulse breakdown in gases [J]. Phys. Rev., 1965, 139 (6A): 1796-1804.
- [8] Mesyats G A, Bychkov Y I, Kremnev V V. Pulsed nanosecond electric discharges in gases [J]. Soviet Phys. Usp., 1972, 15(3): 282-296.
- [9] Kunhardt E E. Pulsed breakdown in uniform electric fields [C]. XVII international conference on phenomena in ionized gases (invited paper), Budapest, Hungary, 1985: 345-360.
- [10] Kawada Y, Hosokawa T. Breakdown phenomena of gas-insulated gaps with nanosecond pulses[J]. J. Appl. Phys., 1989, 65(1): 51-56.
- [11] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3): 874-881.
- [12] Kromholz H, Hatfield L L, Kristiansen M *et al.* Gas breakdown in the subnanosecond regime with voltage below 15 kV [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(5): 1916-1920.
- [13] Su Jiancang, Liu Guozhi, Ding Yongzong, *et al.* Nanosecond sos-based pulsed generator SPG200 [C]. Proceedings of the third international symposium on pulsed power and plasma applications. Mianyang, China, 2002: 258-261.
- [14] Kotov Y A, Mesyats G A, Rukin S N *et al.* A novel nanosecond semiconductor opening switch for megavolt repetitive pulsed power technology: experiment and application [C]. IEEE international pulsed power conference. Albuquerque, USA, 1993: 134-139.
- [15] levinson S J, Kunhardt E E. Investigation of the statistical and formative time lags associated with the breakdown of a gas in a gap at high overvoltage [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1982, 10(4): 266-270.
- [16] Martin J C. Nanosecond pulse techniques [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80 (6): 934-945.
- [17] Namihira T, Wang Douyan, Katsuki S *et al.* Propagation velocity of pulsed streamer discharges in atmospheric air [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 1091-1094.
- [18] 邵涛, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲气体放电机理研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 40-42.
Shao Tao, Sun Guangsheng, Yan Ping *et al.* Overview of nanosecond-pulse gas breakdown mechanics[J]. High voltage engineering, 2004, 30(7): 40-42.

收稿日期: 2004-10-25。

作者简介:

邵涛(1977-), 男, 博士研究生, 从事脉冲功率、高电压技术的研究;

袁伟群(1976-), 男, 博士后, 从事脉冲功率等方面研究;

孙广生(1944-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事脉冲功率、高电压技术等方面的研究;

严萍(1965-), 女, 研究员, 博士生导师, 从事脉冲功率、高电压技术等方面的研究。