



·脉冲功率技术·

纳秒脉冲放电紫外光纤阵列检测与定位方法^{*}

陈 玉¹, 郭洁琳¹, 钟 辉¹, 孙冠姝¹, 陈志强², 贾 伟²

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049; 2. 西北核技术研究所 强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 峰化电容作为电磁脉冲模拟器中用于陡化脉冲输出的关键部件, 在实际工程应用中易发生沿面放电和击穿现象, 采用光电检测系统可对绝缘沿面放电现象进行有效分析。针对峰化电容器沿面放电监测的技术难题, 研制了一套绝缘沿面放电过程光电检测系统, 对绝缘沿面放电现象进行光电检测。首先提出了绝缘介质沿面放电过程光电探测系统的设计方案; 其次, 对系统的时延性能进行了评价; 最后, 完成了绝缘介质沿面放电过程定位实验, 验证了光电探测系统的可行性。实验表明, 该系统能够实现对放电区域的有效定位。

关键词: 纳秒脉冲放电; 紫外光纤; 光纤阵列; 紫外光探测

中图分类号: O461.2+5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210226

Detection and location method of nanosecond pulse discharge ultraviolet fiber array

Chen Yu¹, Guo Jielin¹, Zhong Hui¹, Sun Guanshu¹, Chen Zhiqiang², Jia Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: As the key component of the electromagnetic pulse simulator for steepening pulse output, the peaking capacitor is prone to surface discharge and breakdown in practical engineering applications. The photoelectric detection system can effectively analyze the surface discharge of insulation. Aiming at the technical problem of surface discharge monitoring of peaking capacitor, a set of photoelectric detection system for insulation surface discharge process is developed to detect the phenomenon of insulation surface discharge. Firstly, the design scheme of photoelectric detection system for dielectric surface discharge process is proposed. Secondly, the delay performance of the system is evaluated. Finally, the experiment of locating the surface discharge process of dielectric is completed, which verifies the feasibility of the photoelectric detection system. Experiments show that the system can effectively locate the discharge area.

Key words: nanosecond pulse discharge; ultraviolet fiber; fiber array; ultraviolet detection

随着脉冲技术的发展, 快上升沿、高电压、高重频的大气压纳秒脉冲放电研究受到国内外研究人员的高度关注^[1-3], 纳秒脉冲电压能够使得电子在极短时间内加速, 达到很高的能量(2~20 eV)^[4]。电磁脉冲模拟器是一种专门用于产生与典型核电磁脉冲场相似电磁场的实验设备, 峰化电容是其中的关键部件^[5], 其目的是为了陡化脉冲, 获得快上升沿、慢下降沿的双指数波形^[6]。然而在实际工程应用中, 当高压脉冲源输出纳秒级脉冲高压时, 峰化电容器会发生轴向沿面放电和击穿现象。当放电故障发生时, 放电路径随机产生并伴随光声现象, 直接影响了电磁脉冲模拟器的正常运行和使用寿命。传统的电量检测法容易受到电磁干扰的影响, 难以实现对该放电现象的监测, 而采用光电检测可对绝缘沿面放电现象进行有效分析, 近年来光纤阵列在纳秒脉冲放电探测中的应用取得了显著的发展^[7-10]。本文开发基于光纤阵列的光电探测系统, 观测预放电特性、放电路径、放电强度和发展过程等关键信息, 从而指导峰化电容器的结构设计和优化工作, 具有重大意义。

* 收稿日期: 2021-06-08; 修订日期: 2021-10-20
联系方式: 陈 玉, chenyu@xjtu.edu.cn.

1 理论研究

1.1 电磁脉冲模拟器峰化电容的纳秒脉冲沿面放电现象

峰化电容器是由薄膜层和金属层交替叠加以同轴结构组成,其结构如图1所示,内部通常充有 SF_6 气体。峰化电容电路示意图如图2所示,为了提高脉冲前沿上升速率,峰化电容器 C_p 的电容值通常很小,只有 $10\sim 100\text{ pF}$ ^[11],当火花隙开关 S_1 接通时,储能电容器 C_m 对峰化电容器充电,峰化电容器上的电压值超过 S_2 的接通电压时, S_2 接通,峰化电容器迅速对负载 R_L 放电,使脉冲前沿上升速率($1/C_p R_L$)提高。开关设计非常复杂,要保持高电压,球隙距离要大,这样又增大了寄生电感。为了满足高压和低电感要求,球隙间常充以高气压介质,以六氟化硫(SF_6)气体最常用。高压脉冲电源一般用 Marx 发生器,通过并联充电、串联放电的方法可以获得兆伏级脉冲电压。

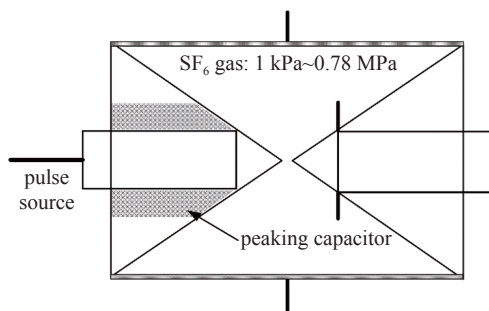


Fig. 1 Structure diagram of peaking capacitor

图1 峰化电容器的结构示意图

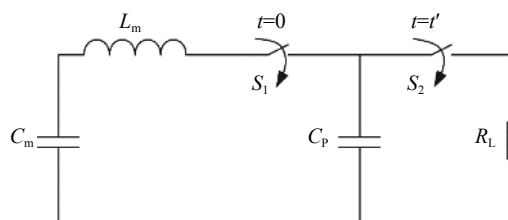


Fig. 2 Circuit of peaking capacitor

图2 峰化电容电路

1.2 气体放电的光谱分布与紫外光纤测量范围

气体产生放电现象时,首先发生的是气体分子的离解现象,然后发生电离产生自由电子和正离子。如果气体中被电离的原子数量非常多,会转换为新的物态生成等离子体。等离子体包含非常广泛的频段光谱。气体放电所形成的等离子体进行复杂运动辐射出不同种类电磁波。其辐射过程与等离子体中粒子的运动状态有很大联系。气体放电的发射光谱便是形成于这一原理。

空气中主要存在的是 N_2 和 O_2 。 N_2 、 O_2 在大气压下放电会发生激发、离解和电离等物理变化^[12]。 N_2 放电产生的光谱范围主要在 $340\sim 825\text{ nm}$, O_2 放电产生的光谱范围主要在 $356\sim 822\text{ nm}$ 。因此空气放电产生的光谱主要集中在 $340\sim 825\text{ nm}$ 范围内。这部分光既包含紫外光也包含可见光。 SF_6 气体放电产生的光谱范围是 $350\sim 720\text{ nm}$,光谱能量主要集中在 $350\sim 450\text{ nm}$ 范围内。因此,对于 SF_6 气体放电的光信号检测,需要使用响应波段集中在紫外波段的光电转换器件。

光纤本身具备较好的绝缘特性,不会受电磁干扰的影响,也不会测试回路中引入电感和电容使待测回路造成影响。同时具有频带宽、损耗低的优点,可以弥补电量检测法的缺点。多通道光纤阵列测量的优点是还可以实现空间分辨测量,是气体放电现象研究中最有前景的方法。本文所选用紫外光纤芯径为 $600\text{ }\mu\text{m}$,传输波段范围是 $200\sim 1780\text{ nm}$,涵盖整个纳秒脉冲放电可能产生的从紫外光到可见光的全部波长范围。

PIN 光电二极管和光电倍增管(PMT)的光谱响应范围分别满足预放电的紫外光谱波段和放电通道形成后的可见光谱波段,因此,采用紫外光纤阵列和光电转换器件组成的光电检测系统可以避免电量法中存在的问题和不足。

2 光电检测系统设计与性能评价

2.1 实验装置与电极结构的设计

实验装置主要包括纳秒脉冲高压电源、纳秒脉冲放电实验平台、光电转换部分、光学成像部分以及数据采集和存储部分,其中纳秒脉冲放电实验平台中的腔体模拟峰化电容器。采用的纳秒脉冲高压电源主要由触发单元、Marx 发生器和直流充电电源构成。腔体内部有圆形电极,其中上电极的半径为 60 mm ,将半径为 70 mm ,厚度为 0.5 mm 的聚丙烯薄膜放置在两电极间,按照平板电极的电容计算公式,可得此结构的等效电容为 460 pF 。模拟峰化电容器的圆形电极与聚丙烯薄膜结构沿面放电是一个随机过程,产生的放电路径并不固定,与此同时伴随放电过程中产生的光信号的探测也并不具备一定规律性。因此,为了验证光电检测系统对于放电时伴随产生的光信号探测的准确性和灵敏性,在设计实验方案时引入针尖来固定放电路径,图3为实验装置上聚丙烯试样与电极的结

构示意图。

2.2 光电测量系统的设计

纳秒脉冲下的沿面放电过程中一般都伴随光的发射,利用光学技术和光学设备可以从一个新的角度来探索和分析纳秒脉冲沿面放电过程中,电荷注入、运输以及分布的机理,提供研究和更多有意义的信息,因此,研究光信号可以更好地理解纳秒脉冲放电的发生机理和发展过程。

测量系统主要包括电气参数测量部分和光学信号监测部分。纳秒脉冲放电电压信号采用电阻分压器测量,纳秒脉冲放电电流信号采用罗氏线圈测量。为测量纳秒脉冲放电时的光学信号,本文设计了包含光纤阵列的光学信号监测系统。

如图4所示,6根光纤与固定装置通过SMA905接头连接,均布在电极周围,整个电极被划分为6个区域,每一根光纤都负责一个区域内的光信号探测,相邻两根光纤的对应的圆心角为 60° 。由于放电过程发生在两电极之间,这样布置6根光纤,圆形电极/薄膜试样结构的任意一处都至少位于一根光纤的数值孔径内,并且每一根光纤探测的放电区域都不重合、不遗漏。这样的设计原则使得该光纤阵列可以保证放电产生的光信号一定可以被采集到^[13]。

5 m长紫外光纤通过与固定在实验腔体上内含有预埋光纤的过舱装置相连接,形成紫外光纤阵列结构。每一根光纤输出与光电转换器件相连接构成一路光路,光源为波长800 nm飞秒级的脉冲光,将光信号引入光电转换设备,监测纳秒脉冲放电不同位置紫外光强随时间的变化情况^[14],每路光路的输出显示在示波器上。实验选用的PIN光电二极管为EOT公司生产,型号为ET-2030,图5为其光谱响应曲线图,光谱响应范围集中在300~1000 nm,能够对放电信号进行有效检测,所用示波器为Tektronix公司的DPO71604C,采样率50~100 GS/s,带宽为16 GHz,可保证纳秒脉冲信号的有效测量。实验所用光电倍增管(PMT)为ET公司生产,型号为9113BW,其检测光谱范围为170~850 nm,同样可以测量紫外波段的光信号。

受限于实验条件,本文选用五路PIN光电二极管和一路光电倍增管,同时对放电过程进行检测。由于放电光微弱,在传输过程中存在衰减,故将光电倍增管正对着针尖所在的位置,以实现放电信号的检测。通过测量可以得到纳秒脉冲放电发生时电压和电流的时间对应关系,以及薄膜表面不同位置在纳秒脉冲放电过程中的发光强度变化情况,从而分析纳秒脉冲放电发生的位置。与此同时,在腔体的视窗上方架立一台相机,运用延时曝光技术拍摄放电图像,从而判断光电测试系统定位的准确性。纳秒脉冲放电光电检测系统示意图如图6所示,实物图如图7所示。

2.3 系统时延性能的评价

考虑到多路光信号在光电检测系统中传输可能存在的时延,以及光电检测系统对待测光信号的响应时间等方面可能存在的问题,需要先对其性能进行评价。首先对5路PIN光电二极管的响应时间进行了测试。使用激光器产生的阶跃信号作为输入光源,测量输出信号的上升时间,即输出电压信号从终值的10%上升至90%所需的时间。表1的测量结果显示,所测响应时间均满足厂家给出的 <300 ps的指标。光电二极管的响应时间存在一定的分散,将5个光电二极管中最大响应时间(对应PIN4)减去最小响应时间(对应PIN1),得到光电二极管的响应时间的偏差不超过32.1 ps,远小于其响应时间本身,因此可以判定,5路光电二极管的响应时间基本一致。

纳秒脉冲沿面放电光电测试系统中,保证紫外光纤阵列探测信号的响应时延一致性是很重要的。多模光纤的

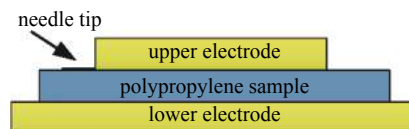


Fig. 3 Structure diagram of polypropylene sample and circular electrode

图3 聚丙烯试样及圆形电极结构示意图

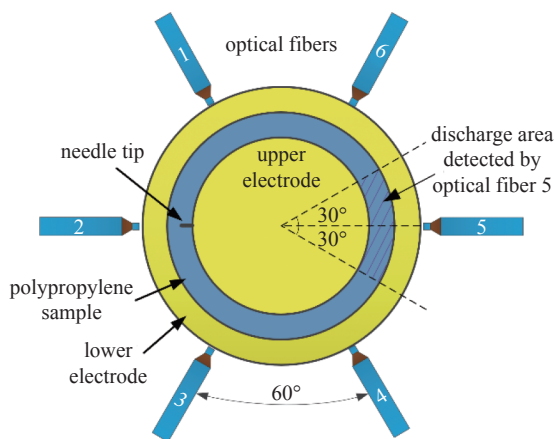


Fig. 4 Top view of sample and circular electrode structure and optical fiber array

图4 试样及圆形电极结构与光纤阵列俯视图

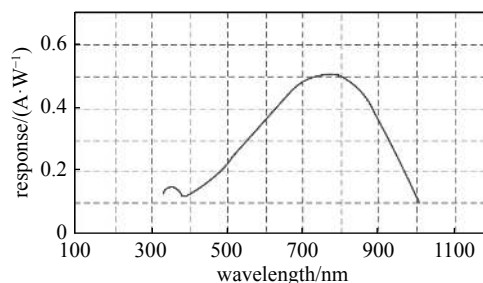


Fig. 5 Spectral response curve of photodiode

图5 光电二极管光谱响应曲线

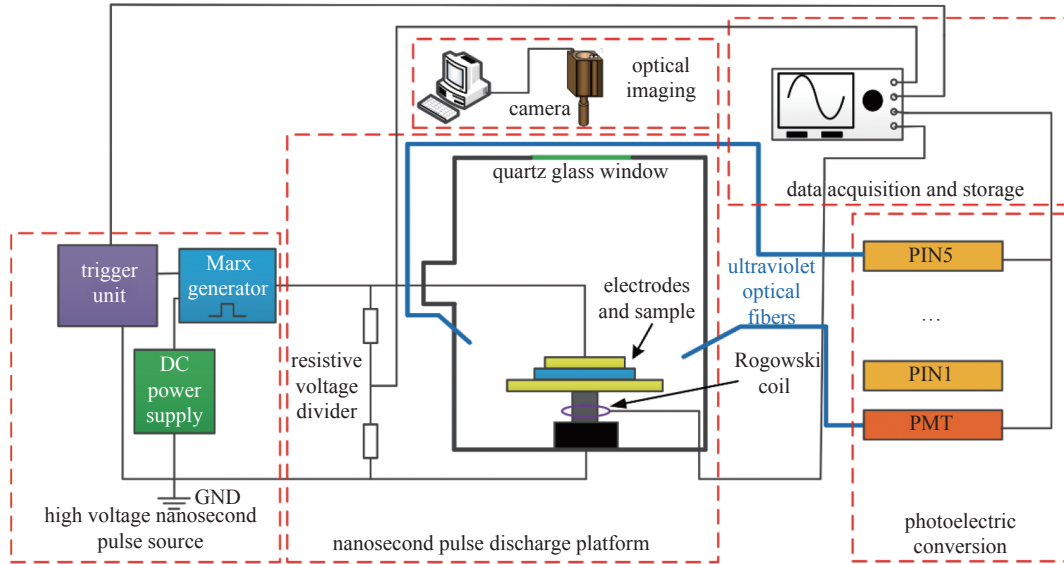


Fig. 6 Illustration of nanosecond pulse discharge photoelectric detection system

图 6 纳秒脉冲放电光电检测系统示意图

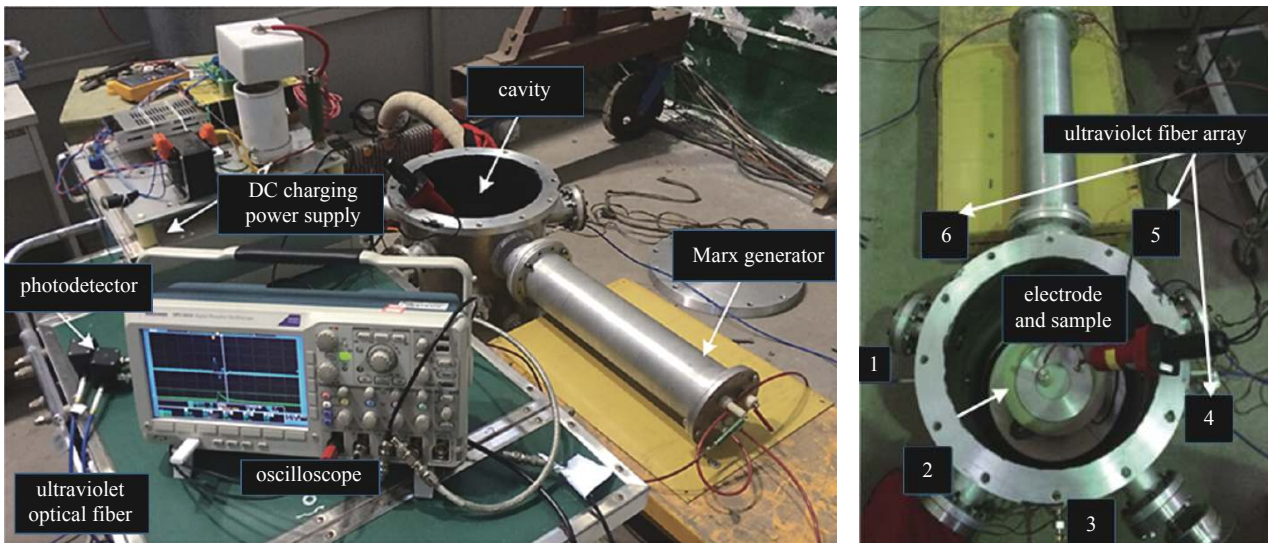


Fig. 7 Picturer of nanosecond pulse discharge photoelectric detection system

图 7 纳秒脉冲放电光电检测系统实物图

缺点是存在模间色散,是指多模光纤中存在的各个导模的群速度不同^[15],导致传输过程中具有不同的群时延和相位延迟,从而导致信号的失真。随后对光电二极管/光纤光路进行了时延一致性分析,光源经过分束器被分为两路,一路通向光电探测器作为参考光路,另一路通向待测紫外光纤与光电探测器。通过示波器显示出两路光的响应波形,两通道的脉冲时间之差即为待测紫外光纤与光电探测器的延迟时间。测量得到的结果如表 2 所示,结果

表 1 光电探测器响应时间测试结果

Table 1 Test results of photodetector response time

photodiode	response time of photodiode/ps
PIN1	206.3
PIN2	225.4
PIN3	229.8
PIN4	238.4
PIN5	225.4
average value	225.1

表 2 紫外光纤与光电二极管信号传输时间测量结果

Table 2 Measurement results of transmission time of UV fiber and photodiode combinations

number	transmission time/ns
PIN1+FIBER1	52.01
PIN2+FIBER2	51.49
PIN3+FIBER3	51.16
PIN4+FIBER4	51.81
PIN5+FIBER5	52.01
average value	51.70

显示, 5 路信号传输时间的偏差不超过 0.85 ns, 远远小于各路探测信号的传输时间, 因此, 紫外光纤阵列和光电二极管构成的光电检测系统的响应时延一致性较好。

3 纳秒脉冲放电实验

3.1 纳秒脉冲放电过程电压电流特性

在空气介质中, 对聚丙烯试样进行了多次纳秒脉冲放电实验, 实验得到的电压电流波形如图 8 所示, 以此为例分析纳秒脉冲放电的时刻。实验采用 Marx 发生器作为高压纳秒脉冲源, 对 Marx 发生器进行直流充电, 直流充电完成后, 手动触发 Marx 发生器, 产生快前沿、窄脉宽的脉冲电压, 施加在圆形电极/薄膜结构上, 直至发生放电, 放电发生后通过罗氏线圈可测得放电电流。从图 8 中可以看出, 当电压开始增大时, 相当于先对试样的等效电容进行充电, 当达到试样能够产生击穿的电压幅值后, 气体产生放电, 电压瞬间跌落, du/dt 增大, 而由于电极结构存在一定的电容, 所以产生了位移电流, 这时流过试样的电流达到峰值, 稍晚于电压峰值出现的时间。

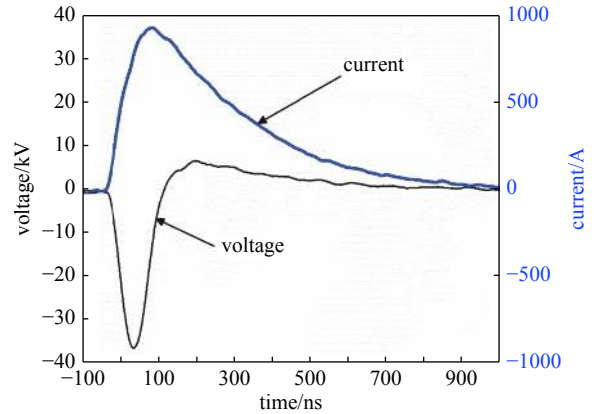


Fig. 8 Nanosecond pulse discharge electrical signal test results

图 8 纳秒脉冲放电气信号测试结果

3.2 纳秒脉冲放电区域的判定

在对电极试样施加脉冲高压之后, 随着纳秒脉冲高压源触发电压的升高, 圆形电极/薄膜结构试样发生放电, 并伴随有光信号产生, 其沿针尖探出的方向为放电路径。在空气介质和 SF_6 介质中进行了实验, 得到的探测结果如图 9 所示, 可知, 当 Marx 发生器输出纳秒脉冲电压施加在圆形电极上时, 脉冲输出电压的半高宽为 75 ns, 下降沿为 37 ns。从纳秒脉冲放电开始, 电压幅值逐渐升高, 当达到足够使试样放电的电压幅值时, 导通通道形成, 试样开始发生沿面放电, 使得电压幅值迅速降低为零, 电流幅值则上升到最大值。伴随放电产生的紫外光信号通过光纤阵列传输给光电探测器, 光电探测器接收到紫外光信号后进行光电转换, 并在示波器上输出响应曲线。由图 9 可知, 2 号紫外光纤对应的位置探测到了光信号的响应, 而其他位置的光纤探测器均没有任何响应, 且与其他几次实验结果相同, 故 2 号光纤所对应的区域发生了放电现象。这也说明了本文光纤阵列探测器的摆放确实满足了不重不漏的设计原则, 可以用来确定试样每一部分产生的放电光学现象。

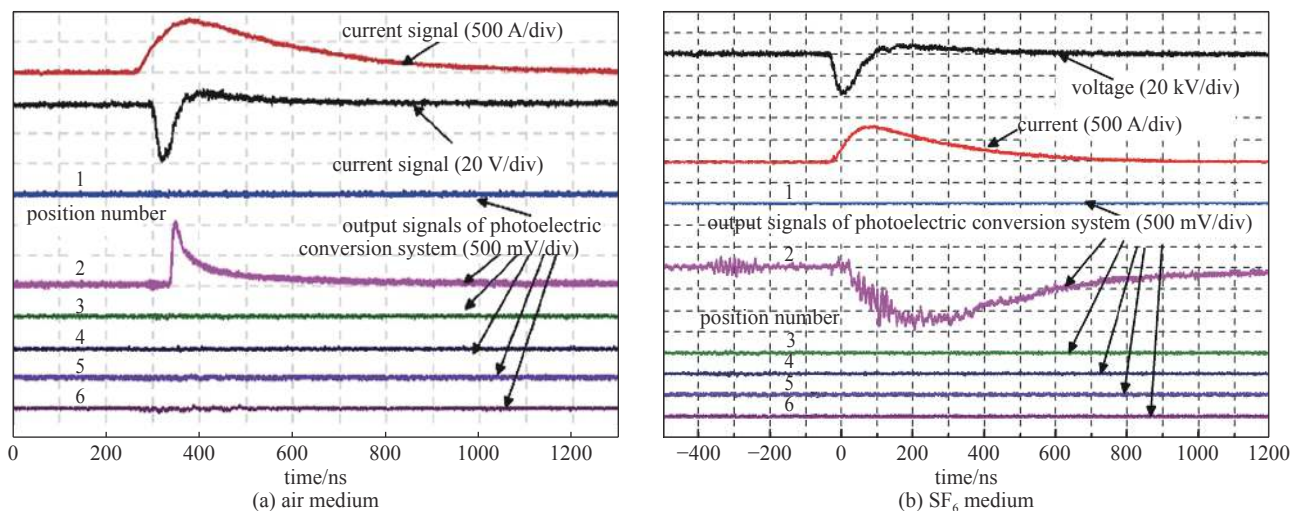


Fig. 9 Experimental results of nanosecond pulse discharge optical signal detection

图 9 纳秒脉冲放电光信号探测实验结果

由于单次脉冲放电的持续时间在几十 ns, 远小于放电热转换特征时间, 热不稳定现象和电子不稳定现象不明显。在空气中, 电子的不稳定性将对放电起到重要影响, 由于边界电场的扰动以及电负性气体原子、分子对电子的吸附作用使电子能量分布向高能量端偏移, 气体的电导率升高, 放电通道在正反馈作用下向弧光放电过度。而

SF_6 气体较为稳定, 当外电场较大时, 分子受激励发生碰撞产生电离, 同时逸出大量电子才会出现放电过程。 SF_6 气体在放电时会被离解, 并且产生大量的粒子能级跃迁。为了配合验证光电检测系统对放电位置的定位准确性, 在对放电光信号检测的同时还采用相机延时曝光技术对放电进行拍摄。如图 10 所示, 通过拍照结果可以看出, 放电路径是从针尖沿电极结构的径向发展, 光学相机拍摄到的放电区域与示波器上光电探测器检测到的光信号在相同的区域, 故验证了光电探测系统对放电位置定位的准确性。

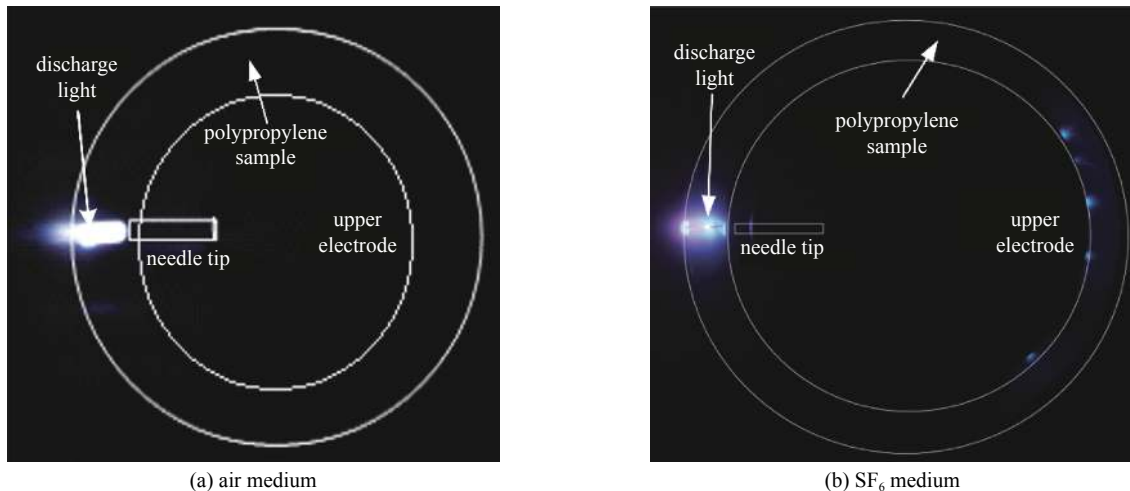


Fig. 10 Images of nanosecond pulse discharge path

图 10 纳秒脉冲放电路径图像

4 结 论

本文模拟峰化电容器的同轴结构和工作环境, 提出了纳秒脉冲放电光电检测系统的总体设计方案, 并完成了系统时延性能的评价, 该系统由纳秒脉冲高压电源、纳秒脉冲放电实验平台、光电转换部分、光学成像部分以及数据采集和存储部分构成。在腔体内充满空气和 SF_6 气体介质的条件下, 分别获得了纳秒脉冲放电电气信号, 同时, 利用紫外光纤阵列不重复、不遗漏地探测了放电过程中腔体内不同位置紫外光信号在纳秒脉冲放电发生过程中的光信号。利用相机的延时曝光技术拍摄放电光图像, 通过比较紫外光纤阵列对光信号的探测结果与延时曝光的结果, 辅助判断了该光电探测系统判断放电位置的准确性。

参考文献:

- [1] 徐双艳. 纳秒脉冲等离子体激励流动建模与数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 2017. (Xu Shuangyan. Modeling and numerical simulation of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge actuators[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017)
- [2] 王军毅. 大气压下 CF_4 高压纳秒脉冲放电的光谱特征研究[D]. 上海: 东华大学, 2021. (Wang Junyi. Investigation on spectral characteristics of CF_4 high-voltage nanosecond pulse discharge in atmosphere[D]. Shanghai: Donghua University, 2021)
- [3] Puertas E C, Dzafic A, Coulombe S. Investigation of the electrode erosion in pin-to-liquid discharges and its influence on reactive oxygen and nitrogen species in plasma-activated water[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2020, 40(1): 145-167.
- [4] 张帅. 纳秒脉冲空气均匀介质阻挡放电发射光谱诊断[D]. 大连: 大连理工大学, 2016. (Zhang Shuai. Optical emission spectroscopy diagnosis of nanosecond pulsed air uniform dielectric barrier discharge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016)
- [5] Miller J R. Perspective on electrochemical capacitor energy storage[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 460: 3-7.
- [6] Jia Wei, Chen Zhiqiang, Tang Junping, et al. A 800 kV compact peaking capacitor for nanosecond generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 094706.
- [7] 李阳, 孙铁平, 盛亮, 等. 多间隙气体开关光纤诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(8): 2000-2004. (Li Yang, Sun Tiejing, Sheng Liang, et al. Diagnosis of multi-gap gas switch with optical fiber detectors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 2000-2004)
- [8] 丛培天, 邱爱慈, 孙铁平, 等. 多间隙气体开关触发放电过程及击穿抖动[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(5): 1303-1306. (Cong Peitian, Qiu Aici, Sun Tiejing, et al. Discharge process and closure jitter of six-stage gas switch under pulsed trigger[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1303-1306)
- [9] 李俊娜, 汤俊萍, 陈维青, 等. 利用光纤诊断紫外预电离开关的导通特性[J]. *高压电器*, 2010, 46(2): 83-85,90. (Li Junna, Tang Junping, Chen Weiqing, et al. Diagnosis of discharge characteristics of UV illumination switch using fiber sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(2): 83-85,90)
- [10] 程淑英. 高能紫外光纤传输阵列[J]. *半导体光电*, 2005, 26(3): 190-192. (Cheng Shuying. High-power UV optical fiber transmission array[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(3): 190-192)
- [11] Palati M, Agarwal R, Sharma A, et al. Generation of sub-nanosecond pulses using peaking capacitor[J]. *Journal of Electrical Systems and Information*

Technology, 2017, 4(1): 95-106.

- [12] 王倩. 大气压下空气/SF₆放电的光谱特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014. (Wang Qian. Spectral characters of Air/SF₆ discharge under atmospheric pressure[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014)
- [13] 郭洁琳. 基于紫外光纤阵列的纳秒脉冲放电光电检测系统的研制[D]. 西安: 西安交通大学, 2016. (Guo Jielin. Development of photoelectric detective system for nanosecond pulse discharge based on ultraviolet optical fibers array[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016)
- [14] 徐熙平, 张宁. 光电检测技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012. (Xu Xiping, Zhang Ning. Photoelectric detection technology and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2012)
- [15] 方武良. 基于多模光纤的高速光传输研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012. (Fang Wuliang. High speed optical transmission based on multimode fiber[D]. Shanghai: Fudan University, 2012)