

# 大功率激光系统中气体开关工作气压的初步研究

曾晗<sup>1</sup>, 吴冬文<sup>1</sup>, 黄颖<sup>1</sup>, 辜玄<sup>1</sup>, 林福昌<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力公司检修分公司, 南昌 330029; 2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 在两电极气体开关的工作系统中, 工作气压决定着开关工作时的静态击穿电压。随着开关的运行, 电极烧蚀会使电极间距扩大, 需要调节开关内部气压, 以使得开关的欠压比(Over-voltage Rate)维持在一个较稳定的水平。欠压比在该水平上可以使得开关的拒动作几率与开关自闪(Self-Fire)几率都在一个可接受的范围。文章对气体开关在不同烧蚀间距下, 不同工作气压下的直流耐压水平进行了比较分析, 以确定开关在运行过程中的工作气压。同时该气压可使气体开关满足其正常触发导通所要求的欠压比。

**关键词:** 放电间隙; 欠压比; 击穿特性; 纳秒脉冲

中图分类号: TN 242

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0131-05

## Research on Working Gas Pressure of Spark Gap Switch in High Power Laser System

ZENG Han<sup>1</sup>, WU Dongwen<sup>1</sup>, HUANG Ying<sup>1</sup>, GU Xuan<sup>1</sup>, LIN Fuchang<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Maintenance Branch, Nanchang 330029, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The static breakdown voltage of the switch is determined by the working gas pressure. Graphite electrodes will erode during the discharge operation of the system. The erosion of the electrodes causes rise of the space of them. We must make sure that the over-voltage rate is relatively stable when changing the inner gas pressure of the switch. When the over-voltage rate of the switch is low, the rate of unstable triggering and self-fire will decline. In this paper we compare the DC breakdown voltage of different switches under different gas pressures and test their triggering reliability. The range of working gas pressure in various stages can be determined by analyzing the experimental data. Based on the over-voltage rate which makes sure conduction of the switch, we finally get the gas pressure regulation method to ensure the operation stability.

**Key words:** spark gap; over-voltage rate; breakdown characteristics; nanosecond pulse

能源模块是大型激光设备中的一个重要单元, 可提供设备所需的脉冲电流以触发氙灯, 使激光束的能量产生增益。

大电流闭合开关是大功率能源系统中的重要组成部分, 因为开关特性及性能将会影响到输出脉冲波形的上升时延和输出幅值。

目前用于脉冲功率系统的开关有以下几种, 引燃管, 气体开关, 真空触发开关以及半导体开关等<sup>[1-6]</sup>。采用石墨作为电极材料的两电极气体开关

适用于一些较为特殊的场合中, 例如, 放电能量达到 1.0 MJ, 放电电流幅值达到 300 kA, 单次转移库仑量达到 100 库仑(C)<sup>[1]</sup>。因此, 两电极气体开关广泛应用于大功率能源模块中。有文献提及, 采用石墨作为电极材料的两电极气体开关 ST-300 系列已经成功应用于美国国家点火装置(NIF)的主放电回路中<sup>[7-8]</sup>。

脉冲发生器用于触发气体开关, 由于开关两端同时加载了直流电压与脉冲电压, 在这二者的共同作用下, 气体开关的击穿是一个复杂的过程。通过大量的实验可知, 在合适的工作气压下气体开关可以被顺利的触发。因为工作气压将会影响到开关的自击穿电压, 过高的自击穿电压将会导致开关的拒

动作,反之,过低的自击穿电压将会导致开关的自闪。工作电压与自击穿电压之比即为欠压比。合适的欠压比取决于气体开关的工作气压。

## 1 纳秒脉冲击穿机理研究综述

有许多学者对气体间隙中纳秒脉冲的击穿机理进行了研究,然而,对直流与纳秒脉冲电压叠加作用下的火花间隙击穿特性的研究却不多。

自1940年代以来,出版了许多关于纳秒脉冲击穿特性研究成果,其中,大多数研究都是基于单次纳秒脉冲。这些研究着重对脉冲电场强度  $E$ , 放电时的气压  $P$ , 击穿时延  $\tau$ , 气体密度  $\rho$ , 和放电间距  $d$  等放电参数之间的联系进行了实验及分析<sup>[9-19]</sup>。

1949年, Fletcher 教授研究了气体密度与击穿时延之间的关系,当场强恒定的时候,击穿时延与放电间距呈线性关系<sup>[9]</sup>。

1965年, Nesterikhin 在 Fletcher 教授实验的基础上对其进行了更深入的研究,研究发现击穿时延的分散性与放电间距呈线性关系<sup>[10]</sup>。

1970年, J. C. Martin 提出了一个关于电场强度、击穿间距、击穿时延之间关系的经验公式<sup>[11]</sup>。

1996年, T. H. Martin 总结并分析了 J. C. Martin 和 P. Felsenthal 的实验数据,在此基础上提出了一个更完善的经验公式<sup>[15]</sup>。1997年, J. Manowski 在他的博士论文中提出了适用于高场强的经验公式<sup>[16]</sup>。近几年,出现了大量关于重复频率下纳秒脉冲击穿机理的研究<sup>[17-19]</sup>。

单次气体间隙击穿的基本理论是 Townsend 理论和流注机理,但是随着脉冲功率技术的发展,纳秒级陡脉冲下的间隙击穿无法用基础理论来解释。如今,一些关于纳秒级陡脉冲下的间隙击穿的假说被提出来<sup>[20-21]</sup>,例如,电子雪崩模型、逃逸电子模型等等。

这些假说认为,在加载电极两端的直流电压的作用下,电极附近的电子密度较大,当纳秒陡脉冲加载于电极时,一些新的电子崩将会围绕在初始电子崩周围产生。高能电子在电场被加速,然后将气体分子电离以产生更多的高能电子。如此反复直到高能电子到达正电极,构成放电通道,导致间隙被击穿。但是这些假说并未对气体间隙击穿中其他参数的影响进行研究,例如气体间隙的工作气压对击

穿过程的影响,气体击穿与欠压比之间的关系等。

## 2 放电回路

大功率激光系统中能源模块的放电回路如图1所示。高库仑大电流脉冲闭合开关是该模块中重要组件之一。在每次放电中,电荷转移量可以达到 100 C,放电电流幅值可达 320 kA。

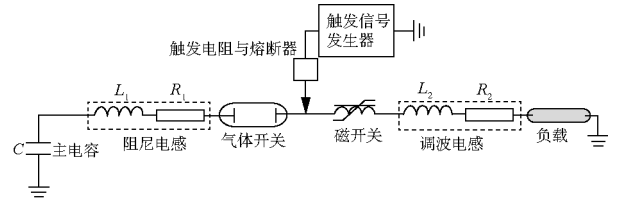


图1 强激光系统放电回路

Fig. 1 Discharge Circuit of Laser System

气体开关结构简图如图2所示,两个石墨材料的电极对称放置,两电极间距可在 8 mm 至 10 mm 之间调节,开关内部工作气压可调范围为 100 kPa 至 400 kPa。

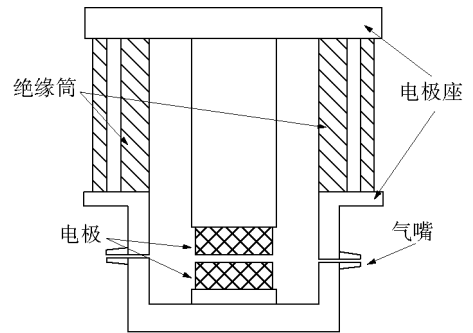


图2 气体开关结构简图

Fig. 2 Structure of the Switch

本文中,将对气体开关在直流电压与纳秒脉冲电压叠加下的击穿特性进行初步的探讨,放电试验回路如图3所示。

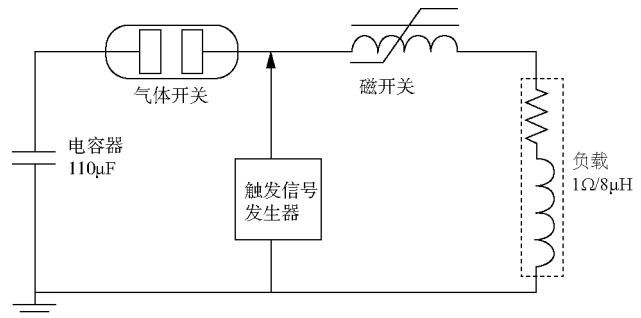


图3 放电试验回路

Fig. 3 Discharge Circuit

在气体开关内部充入干燥空气至某一气压, 调节电容器电压使得开关两电极间电压可以在  $0 \sim 20$  kV 间可调。纳秒脉冲将施加于其中一个电极上, 此时, 磁开关 (Magnetic Switch) 将对该纳秒脉冲起阻隔作用, 当开关被击穿, 形成大电流导通时, 磁开关将迅速饱和, 放电回路导通, 完成放电过程。

纳秒脉冲由 Marx 发生器输出, 输出脉冲的电压幅值约为 120 kV, 上升时延约为 35 ns。由分压器测得的脉冲电压波形如图 4 所示。绿色为模拟曲线, 蓝色为实测曲线, 由于击穿前沿太陡, 测试回路的杂散参数的影响导致分压器测得的放电曲线与模拟曲线略有区别。

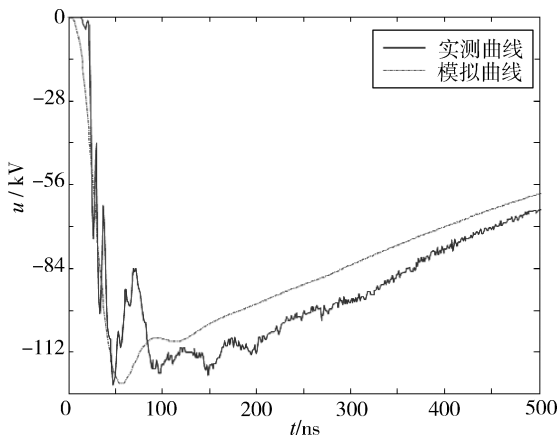


图 4 触发器的输出电压波形  
Fig. 4 Trigger Voltage Waveform

### 3 气体开关的击穿特性

在脉冲电压下气体开关的击穿特性与脉冲电压的幅值及上升时延密切相关。然而, 纳秒脉冲下的击穿特性又有着其独特之处。

图 5 为在不同的工作气压下气体开关的直流耐压水平曲线, 图中每个点为该工作气压下 10 组自击电压的平均值。

Marx 发生器空载输出的电压峰值及上升时延是恒定不变的, 但气体开关内部工作气压和加载于开关两端的直流电压均为可调的。在不同工作气压下, 气体开关的脉冲击穿电压如图 6 所示。图 6 的每个视图显示了在开关两端加载不同的直流电压下, 击穿电压与工作气压关系。

当工作气压可调时, 在各不同工作气压下, 气体开关的脉冲击穿电压与开关两端加载的直流电压间关系如图 7 所示。

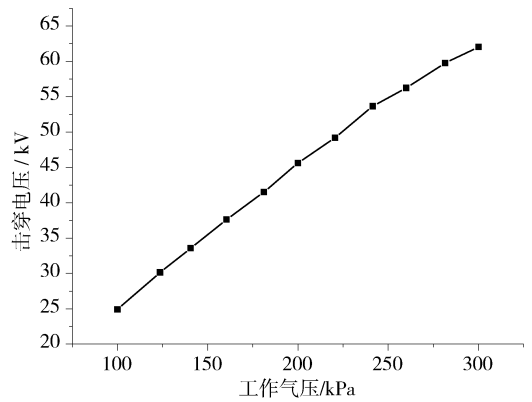
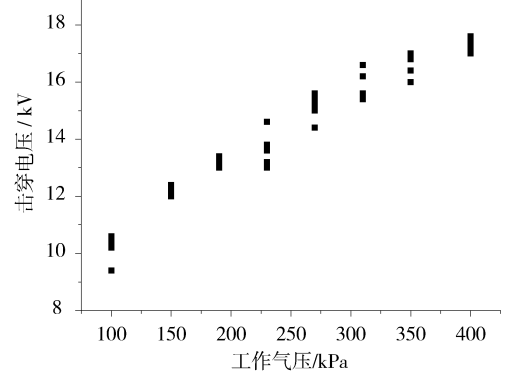
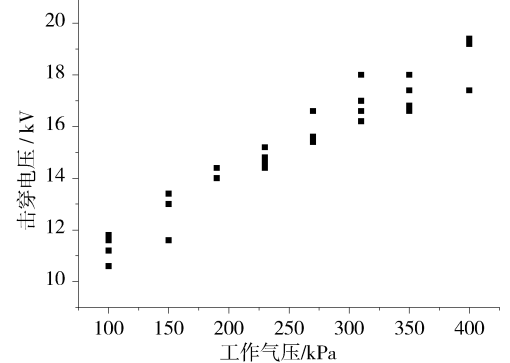


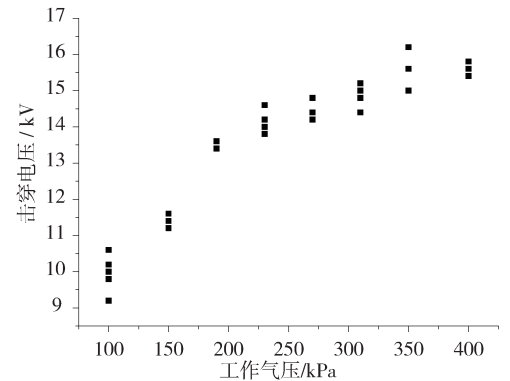
图 5 不同的工作气压下气体开关的直流耐压水平曲线  
Fig. 5 Breakdown Voltage in Different Gas Pressure



(a) 直流电压为 0 V



(b) 直流电压为 5 kV



(c) 直流电压为 10 kV

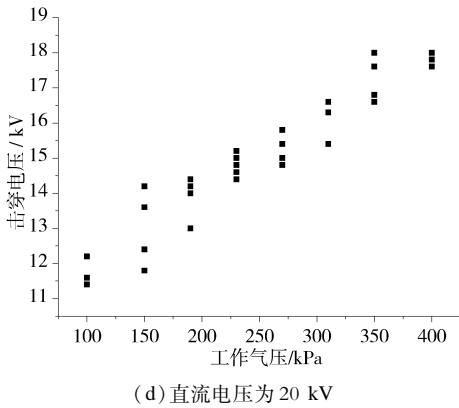


图6 气体开关的脉冲击穿电压与气压关系图

Fig. 6 Relationship Between Gas Pressure and Impulse Breakdown Voltage

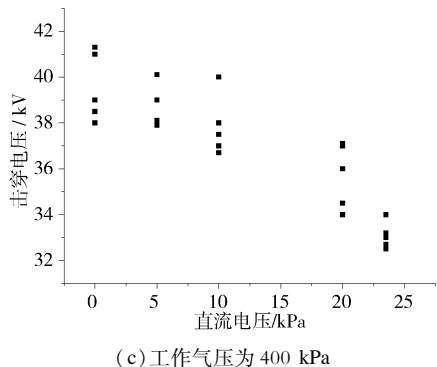
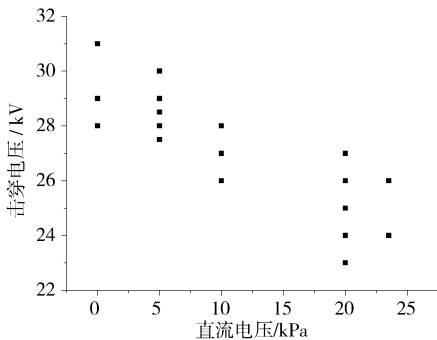
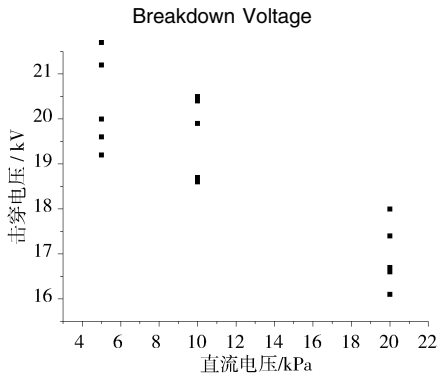


图7 不同直流电压与脉冲击穿电压间的关系

Fig. 7 Relationship Between DC Voltage and Impulse Breakdown Voltage

从图6与图7中可以发现,脉冲条件下气体开关的击穿特性与气体间隙的静态特性相关。因此,直流电压与脉冲电压叠加下气体开关的击穿特性可以通过分析其静态特性来进行研究。从图5中可以看到,气体开关的自击电压与工作气压之间呈线性关系,其自击电压的分散性随着工作气压的增大而增大。

假定,气体开关电极间的初始距离为  $a$  mm,从图5中的曲线可知,气体开关的自击电压与工作气压之间的关系如下所示。

$$U = 3a + 0.2P \quad (1)$$

式中: $U$ 为气体开关的自击电压, kV;  $a$ 为两电极间的初始距离, mm;  $P$ 为两电极间的工作气压, kPa。

式(1)为对图5中测量数据的拟合所得,假定电极的烧蚀率为  $b$  mm/C,经过  $n$  C的库仑量转移之后,气体开关的自击电压与工作气压之间的关系如下所示。

$$U = 3(a + nb) + 0.2P \quad (2)$$

式中: $b$ 为电极的烧蚀率, mm/C。

气体开关的工作气压可以依据式2计算得到:电荷转移量将会导致电极的烧蚀,电极间距将会随着电极的烧蚀而增大,随之而来的是气体开关自击电压升高。此时,需要降低开关的工作气压  $P$ ,以使得开关的自击电压随之降低,以保证开关能够被稳定的触发。

上述过程持续反复,当连续数百次大库仑量放电之后,电极的烧蚀将持续至开关内部气压降至与外部气压相等,此时,已无法通过调节气压的方式降低开关的自击电压,这导致欠压比降低。并且随着自击电压的升高,开关触发失败的几率将会上升。当触发失败率超出设计值时,则可以认为是开关寿命的终结。

气体开关的自击电压取决于其欠压比范围以及直流加载电压,因此,可以通过调节气压对开关的自击电压进行调节。气体开关的气压调节策略如图8所示。

图8所示的为气体开关在四个阶段中自击电压与工作气压的关系曲线。由两电极间加载的直流电压可得其自击电压范围( $U_1, U_2$ ),假定开关初始放电次数为  $n_0$ ,初始状态下,自击电压的下限值  $U_1$ ,工作气压为  $P_0$ ;随着放电的进行,电极间距逐

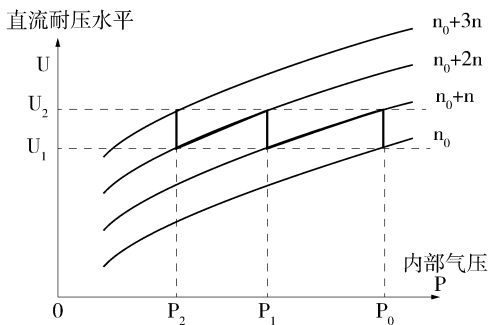


图8 气压调节策略

Fig. 8 Strategy of Gas Pressure Adjustment

渐增大。经过  $n$  次放电之后, 自击电压升至其上限值  $U_2$ , 在该电压下, 气体开关将无法被触发导通。此时, 需要依据图 8 中所示的曲线将开关内部气压由  $P_0$  调整至  $P_1$ , 使得气体开关的自击电压回归至  $U_1$ 。如此反复, 使气体开关的自击电压保持在  $U_1$  与  $U_2$  之间, 以保证开关能够被顺利触发导通。

## 4 结论

通过研究纳秒脉冲与直流电压叠加下大功率能源系统中气体开关的击穿特性与工作气压的关系。冒出脉冲条件下气体开关的击穿特性与气体间隙的静态特性相关。气体开关的自击电压与工作气压之间呈线性关系, 其自击电压的分散性随着工作气压的增大而增大。

气压调节策略可以遵从式(2)所示的规律, 随着电极烧蚀的发展而逐步降低工作气压, 使得气体开关的自闪概率与拒动作概率维持在一个可接受的水平, 并且在该气压范围内气体开关能够被顺利的触发导通。

### 参考文献:

- [1] 曾晗, 林福昌, 蔡礼, 等. 石墨电极烧蚀机理及实验研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 43-49.  
ZENG Han, LIN Fuchang, CAI Li, et al. Study on Mechanism and Experiment of Graphite Electrode Erosion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 43-49.
- [2] 戴玲, 周正阳, 南敬, 等. 基于六间隙棒电极结构的沿面击穿型触发真空开关的工作特点 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 128-134.  
DAI Ling, ZHOU Zhengyang, NAN Jing, et al. Characteristics of a Surface-Breakdown Triggered Vacuum Switch with Six-Gap Rod Electrode System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 128-134.
- [3] 戴玲, 董汉彬, 林福昌, 等. 脉冲功率晶闸管的小型化 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 120-125.  
DAI Ling, DONG Hanbin, LIN Fuchang, et al. Miniaturization

- of Thyristor Applied in Pulse Power Supply [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 120-125.
- [4] KIHARA R, CUMMINGS D B. Commercial High Current Ignitron Development [C]. The 7<sup>th</sup> International IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, 1989: 8-21.
- [5] BHASAVANICH D, HITCHCOCK S S, Creely P M, et al. Development of a Compact, High-energy Spark Gap Switch and Trigger Generator System [C]. The 8<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, San Diego, USA, 1991: 343-345.
- [6] GALAKHOV I V. Capacitor Bank 120 MJ, 22 kV for High-power Nd-glass Laser of Facility ISKRA 26: Conceptual design [C]. Proc 12<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, Monterey, CA, 1999.
- [7] SAVAGE M E, SIMPSON W W, SHARPE R A, et al. Switch Evaluation Test System for the National Ignition Facility [C]. 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, 1997.
- [8] NEWTON M, SMITH D, Moore B, et al. Main Amplifier Power Conditioning for the NIF [R]. Report No. UCRL-LR-105821, 1999: 15-20.
- [9] FLETCHER R C. Impulse Breakdown in the 10-9 Sec. Range of Air at Atmospheric Pressure [J]. Physical Review, 1949, 76(10): 1501-1511.
- [10] NEMYMSTERIKHIN Y E, MEILIKHOV E Z. Pulsed Breakdown of Small Gaps in the Nanosecond Range [J]. Sov. Phys. Tech. Phys., 1964, 9(1): 29-39.
- [11] FMYMELSENTHAL P, PROUMYMD J M. Nanosecond-pulse Breakdown in Gase [J]. Physical Review, 1965, 139(6): 1796-1804.
- [12] MARTIN J C. Nanosecond Pulse Techniques [J]. Proc. IEEE, 1992(80): 934-945.
- [13] KUNHARDT E E, BYSZEWSKI W W. Development of Over-voltage Breakdown at High Gas Pressure [J]. Physical Review, 1980, 21(6): 2069-2076.
- [14] KROMHOLZ H, HATFIELD L L, KRISTIANSEN M, et al. Gas Breakdown in the Subnanosecond Regime with Voltage below 15 kV [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2002, 30(5): 1916-1920.
- [15] MARTIN T H, GUENTHER A H, KRISTIANSEN M. Martin J C on Pulsed Power [J]. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [16] MANKOWSKI J. High Voltage Subnanosecond Dielectric Break-down [D]. U. S. A.: Texas Tech University, 1997.
- [17] TAO H, GUANGSHENG S, PING Y. An Experimental Investigation of Repetitive Nanosecond-pulse Breakdown in Air [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2006, 39(10): 2192-2197.
- [18] MACHERET S O, SHNEIDER M N, Miles R B. Modeling of Air Plasma Generation by Repetitive High-voltage Nanosecond Pulses [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2002, 30(3): 1301-1314.
- [19] MEYATS G A. Production of High Power Nanosecond Pulse [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982.
- [20] MESYATS G A, BYCHKOY Y I, KREMNEY V V. Pulsed Nanosecond Electric Discharges in Gases [J]. Sov. Phys. Usp., 1972, 15(3): 282-296.
- [21] BABICH L P, STANKEVICH Y L. Transition From Streamers to Continuous Electron Acceleration [J]. Sov. Phys. Tech. Phys., 1973, 17(8): 1333-1336.