



·脉冲功率技术·

新型小体积伪火花开关研制*

赵 征, 周 亮, 栾小燕, 张 明, 杨鸿飞

(中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015)

摘 要: 伪火花开关是脉冲功率领域关键器件之一, 具有脉冲电流大、电压范围宽、寿命长及可靠性高等优点。针对整机系统小型化发展的需要, 开展新型小体积伪火花开关研制, 创新性地将触发针引入空心阴极内部, 实现辉光放电电子源注入, 该设计减小伪火花开关的体积, 并通过制管及实验验证设计合理性。测试结果表明, 该产品的阳极工作电压范围为 0.5~10 kV, 最大阳极脉冲电流 40 kA; 在 36 kA 脉冲电流情况下, 工作 2 万次并未发现性能下降; 该样品已通过高温、低温、温循、振动等可靠性试验考核。

关键词: 小体积; 伪火花开关; 脉冲功率技术; 触发针; 可靠性试验

中图分类号: TN134

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220290

Development of miniature pseudo-spark switch

Zhao Zheng, Zhou Liang, Luan Xiaoyan, Zhang Ming, Yang Hongfei

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Pseudo-spark switch, with the advantages of large pulse current, wide operating voltage, long life expectancy and high reliability, is one of the key devices in the field of pulse power technology. To meet the miniaturized development requirement in the complete machine, the miniature pseudo-spark switch has been developed. The electron source is injected by introducing the trigger needle into the hollow cathode innovatively in order to achieve glow discharge. Through this physical design the volume of the pseudo-spark switch has been decreased as well as the design rationality has been verified by producing and testing the pseudo-spark switch. The test results indicate that the anode working voltage is ranged from 500 V to 10 kV and the anode pulse current is 40 kA. Under the condition that the anode pulse current is 36 kA, no sign of performance decline has been found after more than 20000 times of work. The sample has passed the reliability test of high temperature, low temperature, temperature cycle and vibration.

Key words: miniature, pseudo-spark switch, pulse power technology, trigger needle, reliability tests

伪火花开关是一种低气压冷阴极气体放电开关器件, 具有承受电压高、峰值功率大、电流上升速率快、大电流反峰比等特点, 主要应用于高功率脉冲技术领域^[1-2], 譬如高功率脉冲调制器、核爆模拟装置、Z-pinch 驱动源、激光装置、高功率电磁装置等。常见伪火花开关^[3]的直径和高度均在 100 mm 以上。整机系统的小型化、轻量化发展方向, 对其内部起脉冲调制作用的开关提出了减小体积的要求。为此, 项目组开展新型小体积伪火花开关的研制, 并对样管进行性能及可靠性测试。触发管是目前整机系统的主流开关, 但触发管的可靠工作电压范围一般在 50%~100% 额定电压之间, 难以满足整机系统对低工作电压应用的需求; 另外触发管为流注放电类型, 电子温度高、电极烧蚀较为严重, 多次放电后会导致触发管耐压可靠性降低。项目组研制的新型小体积伪火花开关, 其放电机理属于超密集辉光放电, 工作电压范围一般在 5%~100% 额定电压之间, 放电过程对电极损伤小, 寿命可达数万次, 多发次后开关耐压稳定性及触发可靠性高, 为整机系统提供了新的开关选型方案。

1 伪火花开关的工作原理

伪火花开关^[4]是工作于帕邢曲线左支低气压冷阴极气体放电器件^[5], 其典型结构如图 1(a)所示。伪火花开关

* 收稿日期: 2022-09-13; 修订日期: 2022-12-06
联系方式: 赵 征, zhaozheng1975@163.com。

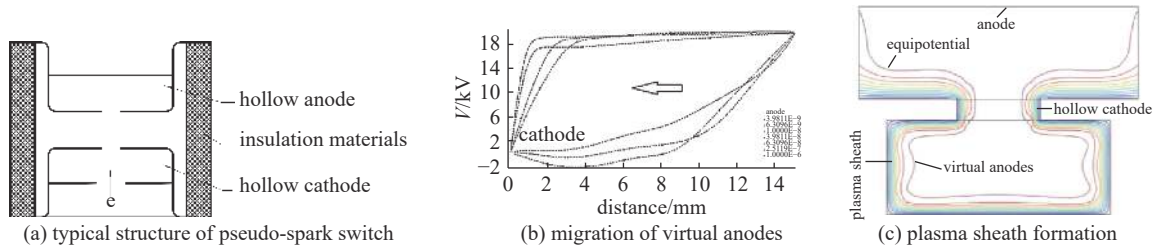


Fig. 1 Typical structure of pseudo-spark switch & voltage equipotential distribution diagram of pseudo-spark discharge

图1 伪火花开关典型结构及伪火花放电电压等势线分布图

主要由空心阳极和空心阴极组成,管内充有能形成等离子放电的气体介质^[6]。当伪火花开关阳极与阴极间施加高电压时,触发单元产生的初始等离子体在阳极电场的作用下从阴极孔洞向阳极迁移,引起孔洞处气体电离并使阳极电势通过孔洞渗透到阴极内建立虚阳极,随着放电等离子体密度的逐渐增大,虚阳极迅速缩短与阴极的距离如图1(b)所示,使阳极电场集中在沿阴极内腔壁表面 μm 级区域,又称为等离子体鞘层,如图1(c)所示,该区域的电场成倍增大,促使虚阳极与整个阴极内腔壁表面发生超密集辉光放电,所产生的高密度电子在几何限制效应下透过阴极孔洞以电子束的形式发射到阳极,最终引起开关的导通,阳极电压快速跌落,脉冲大电流得以形成^[7]。

2 新型小体积伪火花开关结构设计

新型小体积伪火花开关的结构如图2(a)所示。阳极部件采用空心结构设计,阳极极板材料为钨,阳极杯及空心电极盖板采用无氧铜加工,通过高温钎焊形成阳极部件,保证真空密封性能^[8],空心阳极内部的尺寸为 $\phi 15.2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,阳极极板厚度为 2 mm ,其中心有一个直径为 2.5 mm 的通流孔,阳极的顶部设计了排气接口,以便整管腔体内抽真空及注入工作气体。阴极部件结构与阳极部件类似,空心阴极腔体尺寸为 $\phi 15.2\text{ mm} \times 7\text{ mm}$,内表面有效面积约为 7 cm^2 ,可以支取 60 kA 峰值电流,阴极极板中心有一个通流孔,阴极极板材料为钨。耐压间隙距离为 3 mm ,最大耐压达到 30 kV 。触发元件采用钨,钨针的外径为 $\phi 1\text{ mm}$,顶端磨成尖锥状,尖锥角度为 18° ,触发元件与地之间用外径为 8 mm 的陶瓷环作为绝缘材料,陶瓷环与底盘以套封的结构实现封接。通过仿真计算^[9],钨针尖端场强大于 10^7 V/m ,如图2(b)所示,同时钨针锥体外表面与空心阴极腔室内表面距离 6 mm 左右,在 $40\sim 100\text{ Pa}$ 低气压环境下符合辉光放电条件,通过辉光放电在空心阴极^[10]内部产生初始电子,钨针尖端的场致发射以及初始电子共同作用下,引发空心阴极内部弧光放电,使空心阴极内部初始电子浓度达到伪火花放电的阈值。

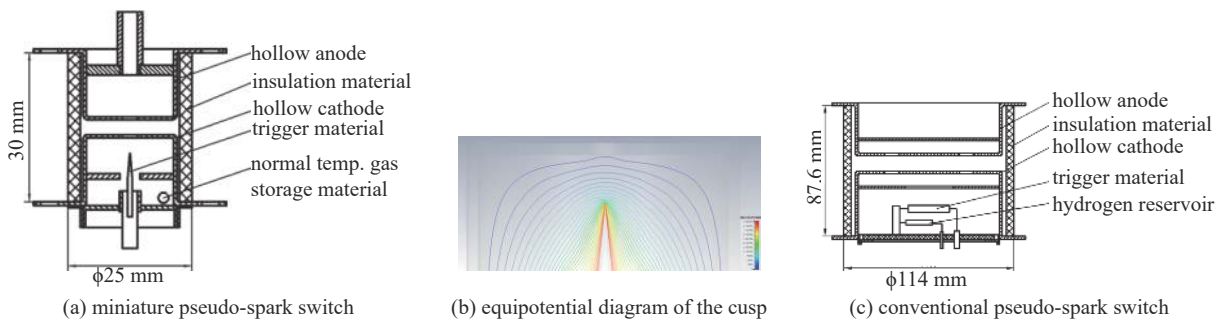


Fig. 2 Schematic diagram of miniature pseudo-spark switch and equipotential distribution diagram of the cusp and schematic diagram of conventional single-gap pseudo-spark switch

图2 新型小体积伪火花开关示意图、等势线分布图及常规单间隙伪火花开关结构示意图

常规单间隙伪火花开关的结构如图2(c)所示,此类开关的触发模式采用介质材料沿面放电的模式^[11-13],为保证触发效率,此类触发元件直径一般大于 20 mm 。新型小体积伪火花开关采用辉光放电触发模式,触发元件为针状,安装在空心阴极下部的中心位置,通过结构设计保证触发针与空心阴极内壁发生击穿,这种触发模式可以有效减小开关直径。常规单间隙伪火花开关的绝缘陶瓷直径普遍在 $\phi 100\text{ mm}$ 以上,新型小体积伪火花开关的绝缘陶瓷直径为 $\phi 25\text{ mm}$ 左右。

常规单间隙伪火花开关内部安装的储氢元件为热子加热型。新型小体积伪火花开关通过常态储氢技术实现管体内部工作气压保持,从结构上实现小体积储氢元件。两种开关的参数对比见表1,图3给出了它们的对比照片。

表 1 新型小体积伪火花开关和常规单间隙伪火花开关参数对比表

Table 1 Comparison between miniature pseudo-spark switch and conventional pseudo-spark switch

	peak forward anode voltage (max)/kV	peak anode current/kA	hydrogen reservoir	size
miniature pseudo-spark switch	25	40	no	φ25 mm×30 mm
conventional pseudo-spark switch	40	80	yes	φ114 mm×87.6 mm

3 新型小体积伪火花开关的性能测试

图 4 为新型小体积伪火花开关的测试电路的实际照片,图 5 为测试电路原理图^[14]。该电路的工作原理是:储能电容 C_N 的初始电压为零,同时伪火花开关的阳极电压 U_a 为零;随后直流高压电源 E_a 通过充电电阻 R_C 向 C_N 充电,当 U_a 升至 E_a 时,充电结束。当触发脉冲电压加到触发极时,伪火花开关迅速导通, C_N 通过其向 R_L 放电,在 R_L 上形成脉冲电流;当阳极电压降得很低时,不足以维持放电电流时,伪火花开关截止,脉冲电流结束^[15]。

为获得更大的放电电流,尽量减少放电回路的分布电感,将伪火花开关的阳极直接连接 C_N 的正高压端;伪火花开关的阴极端通过四根铜带与连接 C_N 的地端连接,在测量脉冲电流时只需用电流互感器(Pearson 101 型)测量其中一路的电路波形,即得到总脉冲电流的 1/4。

图 6 为伪火花开关放电电流(CH₃)及触发脉冲电压(CH₁)波形图。从示波器(Tek 2012C)中读取二路信号。通过高压探棒(Tek P6015A)的测量得到触发脉冲电压信号的波形;通过电流互感器得到脉冲电流波形。从示波器波形图看出,放电回路处于负失配状态,脉冲电流是一个振荡波形;伪火花开关的触发电压为负脉冲,空载触发电压的幅值对伪火花开关阳极着火延迟时间和抖动指标影响较小,影响上述二个指标性能的主要因素是触发电压的脉冲前沿。

表 2 为测试得到的新型小体积伪火花开关的部分电参数和时间参数,表中阳极着火延迟时间数据为放电工作 10 发次实测数据的平均值。

根据表 2 测试数据,绘制开关的阳极电压与脉冲电流峰值的关系曲线,如图 7 所示,伪火花开关的阳极电压与脉冲电流是线性关系,验证了放电回路分布参数稳定度。

项目组对新型小体积伪火花开关进行了多项内容的可靠性试验以及寿命试验,以验证其工作可靠性,见表 3。

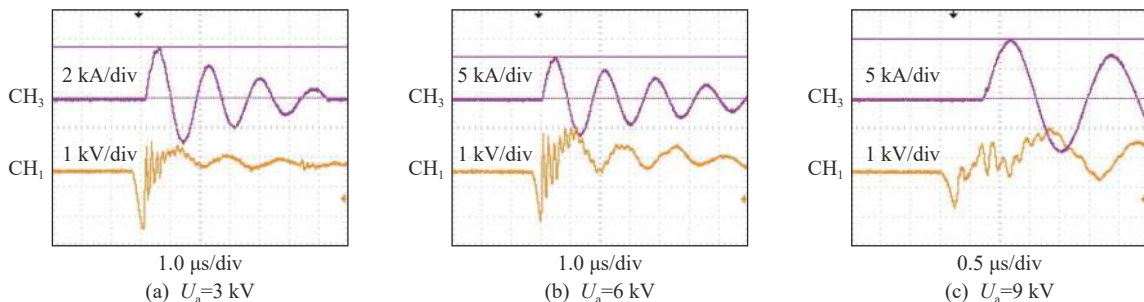


Fig. 6 Discharge waveform plot of miniature pseudo-spark switch

图 6 新型小体积伪火花开关的放电波形

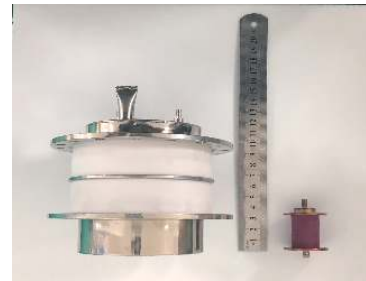


Fig. 3 Comparison between conventional pseudo-spark switch and miniature pseudo-spark switch

图 3 常规伪火花开关和新型小体积伪火花开关对比

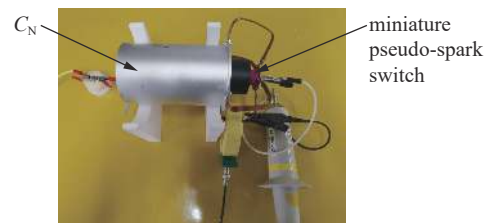


Fig. 4 Testing of miniature pseudo-spark switch

图 4 新型小体积伪火花开关的测试

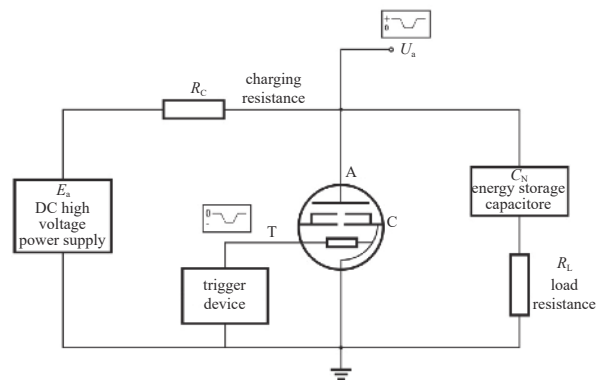


Fig. 5 Test circuit of miniature pseudo-spark switch

图 5 新型小体积伪火花开关的测试电路

表 2 新型小体积伪火花开关实验测试数据

Table 2 Experimental data of miniature pseudo-spark switch

peak forward anode voltage/kV	peak anode current/kA	delay time/ns
2	8.4	245
3	13.3	250
4	17.9	268
5	22.8	247
6	27.6	245
7	31.8	266
8	36.0	275
9	39.9	252

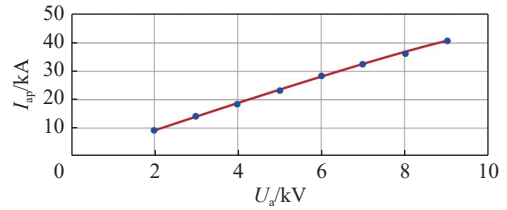


Fig. 7 Diagram of the relationship between forward anode voltage and peak anode pulse current

图 7 峰值正向阳极电压与阳极脉冲电流峰值的关系曲线

表 3 新型小体积伪火花开关可靠性试验的内容

Table 3 Reliability test of miniature pseudo-spark switch

items	conditions and requirements	results
high temperature storage	non-working state; $T=55\text{ }^\circ\text{C}$; $t=48\text{ h}$; recovery time: $\geq 2\text{ h}$.	$U_a=9\text{ kV}$, $I_a=40\text{ kA}$; once/30 s, 10 times, no breakdown, no corona
low temperature storage	non-working state; $T=-40\text{ }^\circ\text{C}$; $t=24\text{ h}$; recovery time: $\geq 2\text{ h}$.	$U_a=9\text{ kV}$, $I_a=40\text{ kA}$; once/30 s, 10 times, no breakdown, no corona
temperature cycle	non-working state; $T_1=-40\text{ }^\circ\text{C}$, $t_1=2\text{ h}$; $T_2=55\text{ }^\circ\text{C}$, $t_2=2\text{ h}$; shift time $\leq 5\text{ min}$; $N=3$; recovery time: 12 h.	$U_a=9\text{ kV}$, $I_a=40\text{ kA}$; once/30 s, 10 times, no breakdown, no corona
sweep frequency vibration	$U_a=14\text{ kV}$, PSD: $0.15\text{ g}^2/\text{Hz}$, $t=10\text{ min}$, once for axial and radial.	no breakdown, no corona

新型小体积伪火花开关在阳极电压 8 kV、放电电流 36 kA 的状态下开展寿命试验,对表征寿命特性的阳极着火延迟时间参数进行记录,绘制出放电次数与阳极着火延迟时间的分布关系图,如图 8 所示。可以看出,阳极着火时间在 260 ns 上下浮动,抖动时间极差小于 30 ns,总计放电 22000 次,未见开关性能减退。

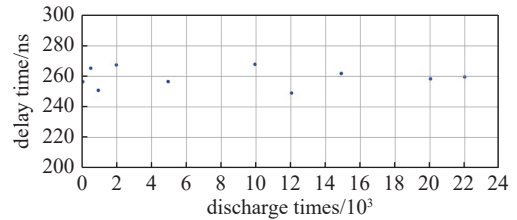


Fig. 8 The distribution plot of anode current delay time

图 8 阳极着火延迟时间分布图 ($U_a=8\text{ kV}$; $I_a=36\text{ kA}$)

4 开关性能比较

新型小体积伪火花开关与同等参数气体放电开关性能的比较见表 4。从表 4 中的参数可以看出,新型小体积伪火花开关、RQ-10 型触发管和 ZQM-9901 型闸流管的峰值正向阳极电压(自击穿电压)相差不多,在工作电压方面可以互换;新型小体积伪火花开关与小型氢闸流管的最低工作电压均为 500 V,工作电压范围是 500 V 至 10 kV,具备工作电压范围宽的优点,而 RQ-10 型触发管的最低工作电压为 6 kV,低电压工作能力不足;闸流管为热阴极放电器件,辅助供电较为复杂且不具备反向电流支取能力;触发管和新型小体积伪火花开关均为冷阴极放电器件,具备反向电流支取能力。

表 4 新型小体积伪火花开关、小型触发管及小型氢闸流管性能比较表

Table 4 Comparison between miniature pseudo-spark switch, trigger tube and miniature thyatron

	peak forward anode voltage/ self-breakdown voltage/kV	minimum operate voltage/kV	peak anode current/kA	minimum trigger voltage/kV	delay time/ns
miniature pseudo-spark switch	10	0.5	40	0.2	280
RQ-10 trigger tube	11	6	32	4.5	-
ZQM-9901 thyatron	10	0.5	0.2	0.18	350
	hot cathode	life/times	size (mm×mm)	total height/mm	draw ability of reverse current
miniature pseudo-spark switch	no	>20000	φ25 mm ×30 mm	53	yes
RQ-10 trigger tube	no	1000	φ36.2 mm ×32.5 mm	36	yes
ZQM-9901 thyatron	yes	-	φ25 mm ×53 mm	79	no

5 结 论

研制的新型小体积伪火花开关,其主体外形尺寸为 $\phi 25\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,与RQ-10型触发管和ZQM-9901氢闸流管综合对比,性能优势明显,它具有峰值脉冲功率高、脉冲电流大、阳极着火延迟时间小、工作电压范围宽、寿命长、可靠性好等特点,将在某些装置中原位替代触发管。它在阳极电压8 kV、阳极脉冲电流36 kA的条件下,工作22000次并未发现寿命终了的迹象,试验过程中未发生自击穿等高压故障,表明其在高电压、大电流的工作状态下有着较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [2] 周志伟. 高电压大功率开关管技术述评[C]//中国电子学会真空电子学会第十三届学术年会论文集. 2001: 340-346. (Zhou Zhiwei. Review of high voltage and high power switch technology[C]//Annual Conference of 13th the Chinese Institute of Electronics Vacuum Electronics. 2001: 340-346)
- [3] 栾小燕, 张明, 周亮. 一种新型大电流脉冲调制器件—伪火花开关[J]. 真空电子技术, 2012(5): 38-41,58. (Luan Xiaoyan, Zhang Ming, Zhou Liang. A new pulse modulator device for large current—pseudospark switch[J]. Vacuum Electronics, 2012(5): 38-41,58)
- [4] 邱毓昌. 伪火花开关的发展与应用[J]. 电工电能新技术, 1997(4): 11-14,20. (Qiu Yuchang. Development and applications of pseudospark switches[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1997(4): 11-14,20)
- [5] Mechtchersheimer G, Kohler R, Meyer R, et al. High repetition rate, fast current rise, pseudo-spark switch[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1986, 19(6): 466-470.
- [6] Bochkov D V, Djailev M V, Ushich V G, et al. Sealed-off pseudospark switches[C]//1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. 2000: 136-140.
- [7] 张明, 周亮, 栾小燕, 等. 面向脉冲功率技术需求的伪火花开关技术[J]. 真空电子技术, 2021(1): 1-9. (Zhang Ming, Zhou Liang, Luan Xiaoyan, et al. Pseudospark switch technologies for pulsed power sources[J]. Vacuum Electronics, 2021(1): 1-9)
- [8] 廖复疆. 真空电子技术[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Liao Fujiang. Technology of vacuumelectron[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008)
- [9] Boeuf J P, Pitchford L C. Pseudospark discharges via computer simulation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(2): 286-296.
- [10] 郭宁, 高军, 聂文虎, 等. 空心阴极在空间技术中的应用[C]//第八届真空技术应用学术年会论文集. 2005. (Guo Ning, Gao Jun, Nie Wenhui, et al. Application of hollow cathode in space technology[C]//Annual Conference of 8th the Chinese Institute of Electronics Vacuum Electronics. 2005)
- [11] 栾小燕, 张明, 周亮. 双间隙伪火花开关沿面放电触发材料的测试与研究[J]. 真空电子技术, 2014(2): 14-17,27. (Luan Xiaoyan, Zhang Ming, Zhou Liang. A new pulse modulator device for large current-pseudospark switch[J]. Vacuum Electronics, 2014(2): 14-17,27)
- [12] 谢建民, 邱毓昌. 伪火花放电开关的陶瓷表面放电触发研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2): 199-202. (Xie Jianmin, Qiu Yuchang. Ceramic surface flashover triggering of pseudospark switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(2): 199-202)
- [13] Frank K, Urban J, Bickes C, et al. Mechanism of the pseudospark initiation for the switches with a trigger unit based on flashover[C]//Proceedings ISDEIV. 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2000: 331-334.
- [14] 张明, 周亮, 栾小燕, 等. 伪火花开关大电容脉冲放电的测试与研究[J]. 真空电子技术, 2017(4): 30-34,57. (Zhang Ming, Zhou Liang, Luan Xiaoyan, et al. Measurement and research of large capacity pulse discharge of pseudospark switches[J]. Vacuum Electronics, 2017(4): 30-34,57)
- [15] 徐远灿, 刘庆想, 王庆峰, 等. 冷阴极闸流管的同步特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 717-720. (Xu Yuancan, Liu Qingxiang, Wang Qingfeng, et al. Synchronization characteristics of cold cathode thyatron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 717-720)