

激光触发伪火花开关的研究

周 亮, 张 明, 孙承革

(中国电子科技集团公司 第十二研究所, 北京 100015)

摘 要: 通过等离子体建模仿真及物理实验结合的方式验证了激光触发伪火花开关的可行性。分别使用波长 266 nm 和 532 nm 的激光, 对激光触发伪火花开关的最低激光触发能量、阳极着火延迟时间和时间跳动三项参数进行测试。在非聚焦模式下, 仅调整激光能量, 测得开关在波长 266 nm 激光触发下, 最低触发能量为 15 mJ, 该触发能量下, 阳极着火延迟时间约为 340 ns, 时间跳动约为 40 ns; 在波长 532 nm 激光触发下, 最低触发能量为 83 mJ, 该触发能量下, 阳极着火延迟时间约为 420 ns, 时间跳动约为 60 ns。在维持实验平台不变的情况下, 仅对入射激光进行聚焦, 测得波长 266 nm 激光触发下, 最低触发能量为 4 mJ, 当触发能量 8 mJ 时, 阳极着火延迟时间 190 ns, 开关时间跳动小于 1 ns; 波长 532 nm 激光触发下, 最低触发能量为 6 mJ, 当激光触发能量为 8 mJ 时, 阳极着火延迟时间 240 ns, 开关时间跳动小于 1 ns。

关键词: 激光触发; 伪火花开关; 时间参数; 高功率脉冲; 空心阴极

中图分类号: TN134

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190094

Preliminary study of laser-triggered pseudospark switch

Zhou Liang, Zhang Ming, Sun Chengge

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

Abstract: Laser-triggered pseudospark switches, also called back-lighted thyratrons (BLTs), are low pressure, high voltage, high current glow-mode switches. The feasibility of BLTs is verified. The laser beams with wavelengths of 266 nm and 532 nm were used in the test. In the non-focused mode, the minimum trigger energy for 266 nm laser is 15 mJ, the anode ignition delay time is about 340 ns, and the time jitter is about 40 ns. The minimum trigger energy for 532 nm laser is 83 mJ, the anode ignition delay time is about 420 ns, and the time jitter is about 60 ns. In the focused mode, the minimum trigger energy for 266 nm laser is 4 mJ, when the laser trigger energy is 8 mJ, the anode delay time is 190 ns, the jitter is less than 1 ns. The minimum trigger energy for 532 nm laser is 6 mJ, when the laser trigger energy is 8 mJ, the anode delay time is than 240 ns, the jitter is less than 1 ns. The methods to further reduce the energy of the laser trigger will be studied in the future.

Key words: laser trigger; pseudospark switch; time parameter; high power pulse; hollow cathode

近 50 年来, 脉冲功率技术获得了蓬勃发展, 已成为现代新概念武器发展的基础。但是随着脉冲功率技术在更高峰值功率与更大输出能量等方向的不断进步, 高功率脉冲开关作为其核心器件, 逐渐成为制约其发展的关键瓶颈之一^[1]。例如在大型 LTD 装置、Marx 发生装置、电磁脉冲武器、粒子束武器、可控聚变、电磁脉冲成型等工程领域中, 往往需要多个单元串并联组合运行, 以实现更高的系统输出峰值功率, 这对高功率开关提出了新的要求: 开关需要具有良好的同步性能, 即具备稳定的触发延迟时间和 ns 量级的时间跳动^[2]。

目前应用于脉冲功率技术的高功率脉冲气体开关主要有: 高压脉冲气体开关和低压脉冲气体开关(伪火花开关、脉冲氢闸流管等)。高压脉冲气体开关初始电子的提供方式为金属阴极场致发射, 所以在脉冲放电过程中电极的参与度很高, 电极损伤大, 寿命低。低压脉冲气体开关初始电子的提供方式分别为空心阴极辉光放电和热阴极电子发射^[3]。此类开关放电类型属于弧光放电和密集辉光放电, 在脉冲放电过程中, 电极的参与度低, 电极损伤小, 寿命长; 现有的低压脉冲气体开关的触发方式均为电脉冲触发。在多开关串并应用中需要配套触发系统为每个开关提供触发脉冲, 同时触发系统需要根据应用情况的不同进行高压隔离、电磁屏蔽、不同开关间触发信号的时序控制等, 增加了系统设计和建设的难度。激光触发能量可以采用空间光路和光纤等方式传输, 此

种传输方式高压隔离及电磁屏蔽实现方法简单,能够大幅降低系统设计和建设的难度,所以激光触发类的开关具有研发价值。

在物理机理上,当光束照射在金属或半导体材料表面时会产生一定密度的初始电子,在正电场的加速下,电子会与工作气体(氢气、氩气、氮气等)发生碰撞进而形成等离子体,在不同的电极结构下形成不同的放电效应^[4]。本文介绍了一种新型的激光触发伪火花开关,电极结构分别为空心阴极和空心阳极结构,利用 266 nm 及 532 nm 二种不同波长激光辐照金属材料产生初始电子,形成空心阴极效应,使开关具备通大峰值电流的能力。

1 激光触发伪火花开关可行性

1.1 伪火花开关工作机理

伪火花开关是一种工作于帕邢曲线左支的低气压放电类开关。其典型结构见图 1。伪火花开关的放电过程主要经历汤森放电、阴极正离子鞘层形成、空心阴极效应、超密集辉光放电、金属弧这 5 个阶段。若要建立空心阴极效应,空心阴极腔室内部电子密度需达到 10^{18} m^{-3} ,后续随着放电电流的增加逐渐向超密集辉光和金属弧进化。

1.2 激光触发伪火花开关可行性分析

根据金属光电子发射理论及爱因斯坦定律,光电子的最大初动能 W_{\max} 只与入射光的频率 ν 成线性关系。由实验测得 W_{\max} 与 ν 的关系曲线可知(图 2),当入射光的频率 ν 比极限频率 ν_0 高很多时,实验曲线是一条直线,当 ν 接近于 ν_0 时,曲线开始逐渐偏离直线。即使当 $\nu < \nu_0$ 时,由于多光子效应仍可测量到光电子发射,并不存在一个使光电子发射截止的确定的红阈频率。

激光辐照金属光电阴极,会有一些几率产生自由电子^[5]。在激光触发伪火花开关中,工作气体为氩气,压力为 100 Pa 左右,与激光触发高压火花开关不同,在低气压环境下,激光在开关内部的空间传输损耗极小,大部分能量均与金属光电阴极发生能量交换,产生光电子,同时由于氩气自身极易被电离,所以在空间传输过程中也会电离工作气体,产生自由电子,起到了预电离作用。

本次实验采用的金属阴极材料的电子逸出功为 $6.08 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。实验采用 266 nm 激光进行光电触发,入射光子能量 $h\nu = hc/\lambda$ (其中 h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为入射光波长),计算得到入射光子能量为 $7.47 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

金属光电子发射理论中,电流密度公式为

$$j_1 = \alpha A_0 T^2 f(\mu) = \alpha A_0 T^2 f [h(\nu - \nu_0)/kT] \quad (1)$$

式中: α 是出射电子数与入射光子数的比例系数; A_0 是热电子发射公式中的普适常数; T 是热力学温度; $f(\mu)$ 是福勒光电子发射方程; k 是波耳兹曼常数。

激光触发开关为常温态工作, $T = 300 \text{ K}$, 计算得到 $\mu = 33.5 \gg 1$ 。当 $T > 0 \text{ K}$ 时,有

$$f(\mu) \approx \pi^2/6 + \mu^2/2 = 563 \quad (2)$$

将 $f(\mu)$ 代入公式(1)中,解得 $j_1 = \alpha \times 6.2 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$ 。在金属光电子发射理论中需要考虑表面势垒对逸出电子的反射作用,即

$$\alpha = \beta D \quad (3)$$

式中: β 为受激电子的浓度与正常电子浓度的比例系数; D 为平均透射系数。在金属光电阴极中 α 通常取 10^{-8} 量级,因此计算得出 $j_1 = 62 \text{ A/cm}^2$ 。

为了达到预先判断激光触发伪火花开关的可行性的目的,利用计算机仿真的方法进行建模分析,为了简化仿

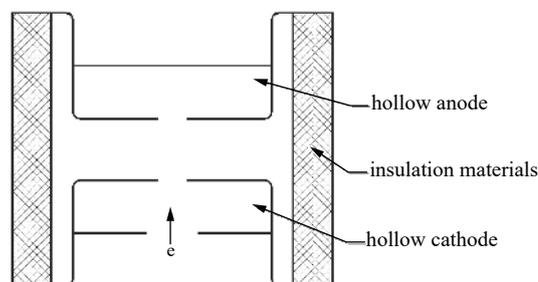


Fig. 1 Typical structure of pseudospark switch

图 1 伪火花开关典型结构

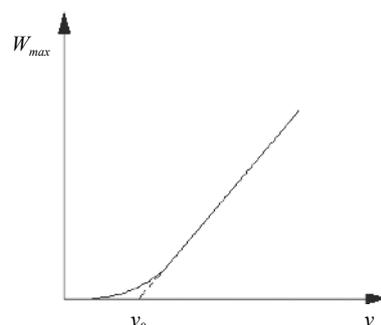


Fig. 2 Relationship between maximum initial kinetic energy and laser frequency

图 2 最大初动能与入射光频率的关系曲线

真计算, 实现趋势性判断, 在仿真过程中不考虑反射光对金属的二次电离、反射光对路径中气体的电离以及电场作用下的二次电子发射, 而上述三点均对电子密度的提升有益。在仿真模型中初始边界条件设置为: 阳极极板与阴极极板的距离为 3 mm, 阴极开孔直径 3 mm, 空心阴极尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 光发射区域处于空心阴极内表面正中心, 直径为 $\phi 4 \text{ mm}$, 光电流密度 62 A/cm^2 , 阳极设置直流电压 500 V, 储能电容 100 nF, 仿真计算结果如图 3 所示。通过仿真可以得到, 光触发开关在 90 ns 时充电电压开始跌落, 104 ns 时, 测试回路峰值电流达到最大值 4.5 kA, 116 ns 时, 储能元件能量泄放完毕, 电流降至百安量级, 管压降维持在 10 V 左右。空心阴极内电子密度最大值 $3.15 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 达到空心阴极效应的阈值。通过仿真结果初步判断激光触发实现空心阴极效应的方案可行。

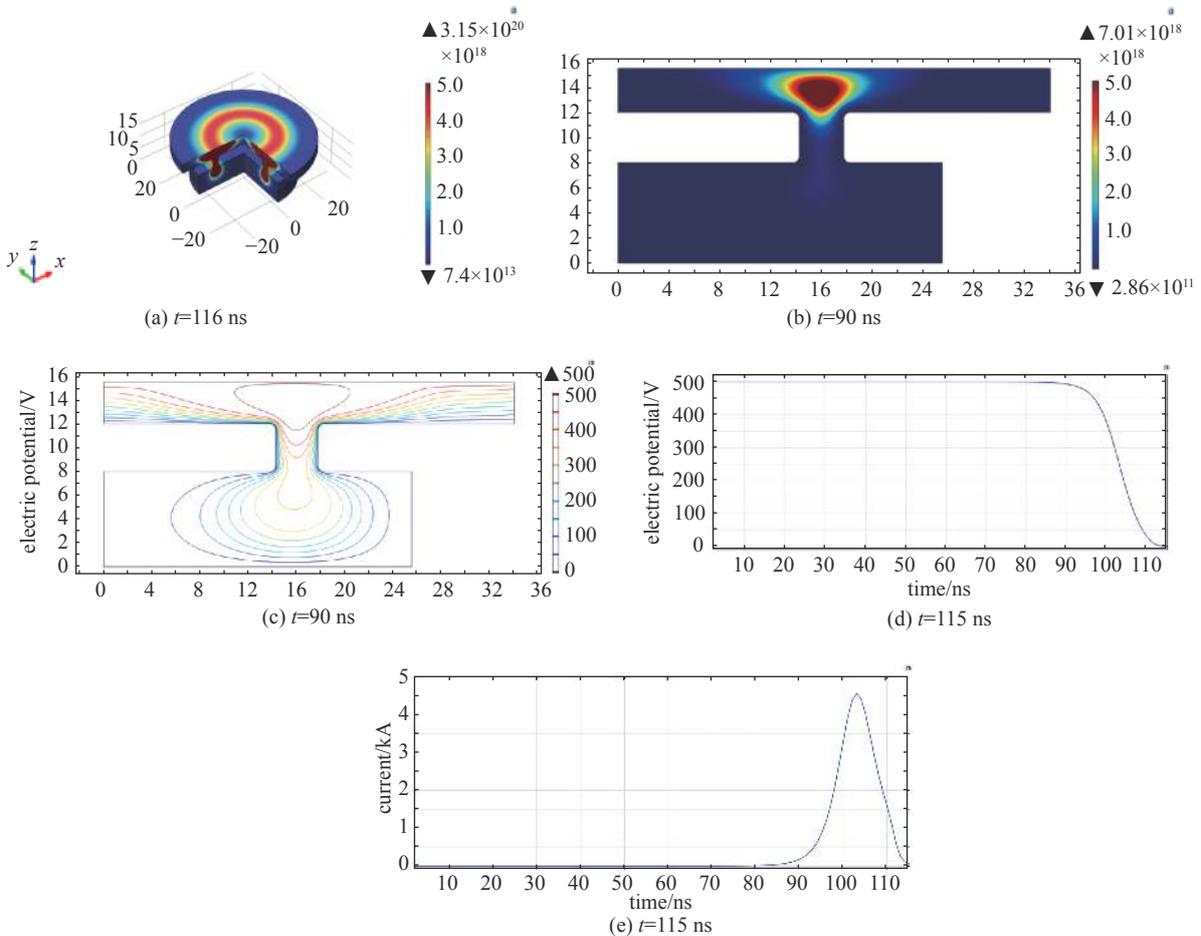


Fig. 3 Simulation results of pulse discharge based on laser-triggered pseudospark

图 3 激光触发伪火花开关脉冲放电仿真结果

1.3 设计及实验验证

图 4 为测试系统的负高压测试电路图, 包括负高压直流电源 U_a 、氢储存器电源 U_H 及激光光源 L_t 。样管阳极接地, 阴极接负高压 ($U_a \geq -20 \text{ kV}$)。负高压直流电源 U_a 用于调节阴极负高压数值, 并采用高压探棒测量阴极与阳极间的脉冲电压 U_{ap} ; 氢储存器电源 U_H 调节管内氢气压强, 管内压强通常在 $10 \sim 100 \text{ Pa}$ 的工作范围, 氢储存器电压 U_H 值越大, 管内氢气压强越大^[6-8]; 激光器能量可在 $0.01 \sim 100 \text{ mJ}$ 范围内调节。

测试设备与元器件: 被测激光触发伪火花开关样管, 高功率阻性负载 $R_L (5 \Omega)$, 脉冲电容器组 ($C = 160 \text{ nF}$), 氢储存器电源, 高压充电电阻 ($10 \text{ k}\Omega$), 负高压电源 ($-25 \text{ kV}/0.02 \text{ A}$), 泰克 P6015A 高压探头, 示波器等。

激光器有两种: (1) $\lambda = 266 \text{ nm}$ 的近紫外激光器, 脉冲能量 E 在 $0.01 \sim 10 \text{ mJ}$ 范围调节, 光脉冲宽度 10 ns ; (2) $\lambda = 532 \text{ nm}$ 激光器, 脉冲能量 E 在 $1 \sim 100 \text{ mJ}$ 范围调节, 光脉冲宽度 10 ns 。

测试系统的负高压测试电路如图 4(a) 所示, 整个电路为 RC 放电电路, 脉冲电容器组由 8 个 $20 \text{ nF}/30 \text{ kV}$ 的筒状电容器并联组成, 总电容值为 160 nF , 负载电阻由 2 个 2.5Ω 电阻串联而成, 伪火花开关样管为金属-陶瓷结构^[6-8]; 负高压直流电源 U_a 用于给电容器组充电, 充电电压绝对值范围 $0 \sim 25 \text{ kV}$; 整个电路通过宽铜板连接, 其引起的回路电感及电阻可以忽略。激光器的型号为 Dawa-200 型四倍频激光器, 具备同步的电脉冲信号的输出, 该信号作为

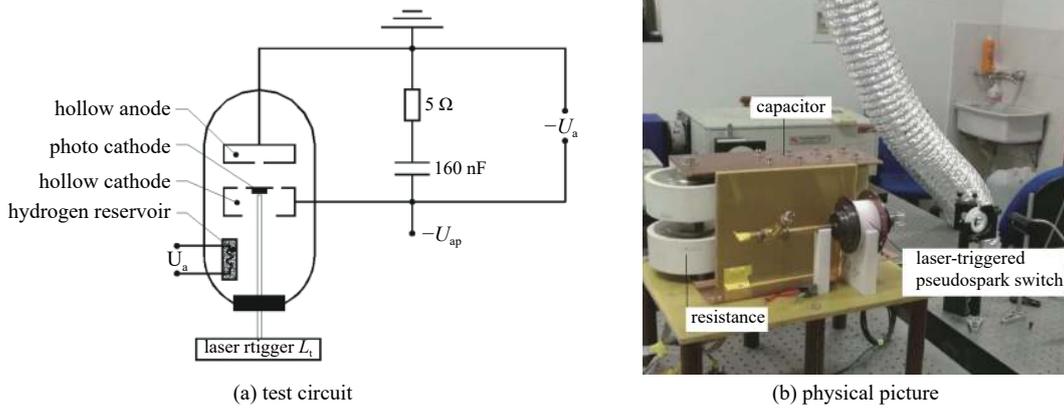


Fig. 4 Negative high voltage test circuit and physical picture

图 4 负高压测试电路图及实物图

基准信号, 波长 266 nm 激光基准信号的幅值为 15 V 的方波信号, 波长 532 nm 激光基准信号幅值为 5 V 的方波信号, 通过 Edmund 探头和能量计来测量激光触发能量。

2 实验结果

分别采用波长 266 nm 和 532 nm 激光光源进行实验。聚焦模式定义为利用透镜对激光聚焦; 非聚焦模式定义为不采用透镜对激光聚焦。每种光源在非聚焦模式和聚焦模式两种情况下开展测试工作。在相同的氢储存器电压 U_H 和阳极电压 U_a 下, 通过调节光源波长和激光能量开展测试。

2.1 非聚焦模式下的激光触发实验

如图 5 所示, 激光器输出光斑直径 $\phi 8$ mm、脉宽 10 ns 的激光, 光束入射到距离激光器出光口约 500 mm 处的样管石英窗中。在空心阴极背板处放置金属光电阴极, 激光脉冲与金属光电阴极发生光电效应, 并在电极表面射出具有一定密度的光电子, 作为初始电子建立空心阴极效应并实现整管导通^[9-10]。

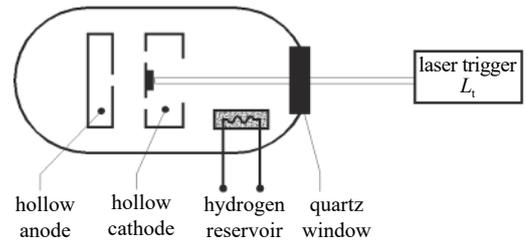


Fig. 5 Schematic diagram of non-focused mode

图 5 非聚焦模式示意图

在保持氢储存器电压 U_H 和阳极电压 U_a 一定的条件下, 影响开关时间参数的主要因素为透过石英窗的激光能量与波长。由表 1 可以看出, 波长 266 nm 的近紫外激光最低触发能量为 15 mJ, 阳极着火延迟时间为 360 ns; 而波长 532 nm 的激光最低触发能量为 83 mJ, 阳极着火延迟时间为 420 ns。脉冲电流 $I_{ap} = 2.4$ kA, 电流上升沿 $\tau_{rise} = 130$ ns。在两种波长激光下测试, 随着激光能量的提升, 阳极着火延迟时间缩短, 开关导通性能提高。

表 1 非聚焦激光触发能量 E 测试结果

Table 1 Test results of non-focused mode laser triggering energy E

$C/\mu\text{F}$	R_L/Ω	U_H/V	$ U_a /\text{kV}$	λ/nm	E/mJ	U_R/kV	$\tau_{\text{delay}}/\text{ns}$
0.16	5	5.4	15	266	15	12	340
0.16	5	5.4	15	266	22	12	290
0.16	5	5.4	15	266	30	12	210
0.16	5	5.4	15	532	83	12	420
0.16	5	5.4	15	532	120	12	350
0.16	5	5.4	15	532	140	12	288

图 6 及图 7 所示波形为阳极电压跌落及激光器输出标准信号波形, 图中纵坐标为电压, 横坐标为时间。CH1 所示波形为阳极电压 U_R 跌落波形, 单位为 kV; CH2 所示波形为激光器标准信号波形, 单位为 V。波形图中二条纵向标尺分别测量激光器标准信号开始的时间和阳极电压开始跌落的时间, 二个时间差值为阳极着火延迟时间 τ_{delay} 。

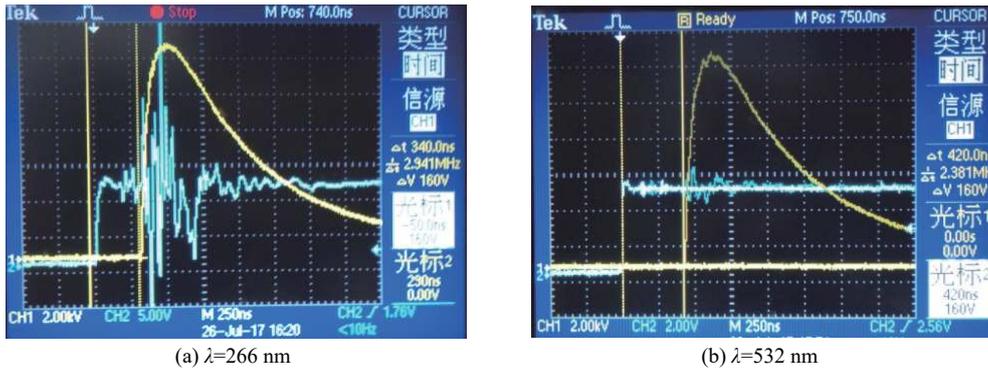


Fig. 6 Pulse discharge waveform of laser-triggered pseudospark (non-focused; by 266 nm and 532 nm laser beams)

图 6 非聚焦状态下, 266 nm 和 532 nm 阳极电压跌落及激光器标准信号波形

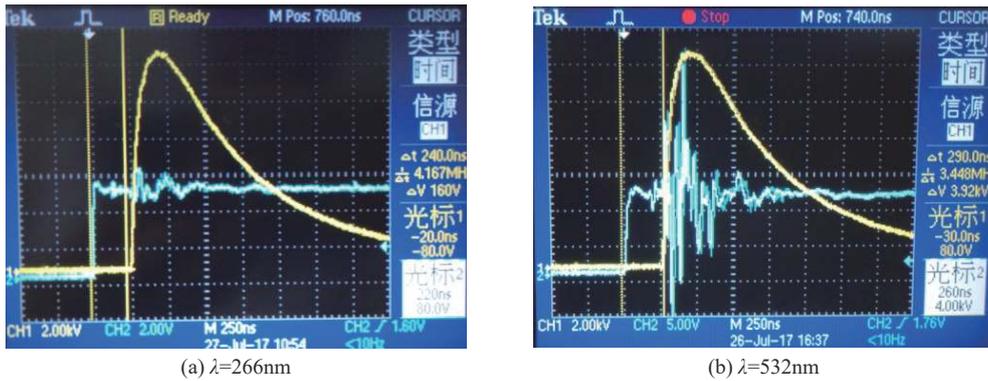


Fig. 7 The pulse discharge waveforms of laser-triggered pseudospark (focused; by 266 nm and 532 nm laser beams)

图 7 聚焦状态下, 266 nm 和 532 nm 阳极电压跌落及激光器标准信号波形

2.2 聚焦模式下激光触发实验

采用透镜将入射到样管内的激光进行聚焦(图 8), 以此方式来提升光能量密度, 进而提升光电离效率。由表 2 可以看出, 波长 266 nm 的激光聚焦后, 开关的最低激光触发能量由 15 mJ 降为 6 mJ, 阳极着火延迟时间 τ_{delay} 由 360 ns 降为 250 ns; 而波长 532 nm 的激光聚焦后, 开关的最低激光触发能量由 83 mJ 降为 6 mJ, 阳极着火延迟时间 τ_{delay} 由 420 ns 降为 280 ns。

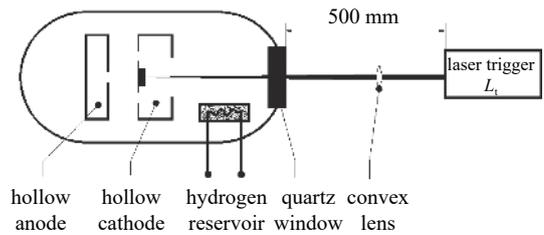


Fig. 8 The schematic diagram of focused mode

图 8 聚焦模式示意图

表 2 聚焦激光触发能量 E 测试结果

Table 2 Test results of focusing laser triggering energy E

C/ μ F	R_L/Ω	U_H/V	$ U_a /kV$	λ/nm	f/cm	E_{min}/mJ	U_R/kV	τ_{delay}/ns
0.16	5	5.4	15	266	30	6	12	240
0.16	5	5.4	15	266	30	8	12	190
0.16	5	5.4	15	266	30	10	12	180
0.16	5	5.4	15	532	40	6	12	290
0.16	5	5.4	15	532	40	8	12	240
0.16	5	5.4	15	532	40	10	12	240

2.3 阳极着火延迟时间与时间跳动

影响开关阳极着火延迟时间与时间跳动的主要因素为: 氢气压强、触发激光波长与激光触发能量。根据气体放电原理与物理拟合实验发现, 阳极着火延迟时间与时间跳动主要由激光触发能量与氢气压强决定^[11-12]。因此, 在本次实验中保持氢储存器电压 $U_H=5.4$ V、工作电压 $|U_a|=15$ kV 不变, 排除氢气压强与工作电压的影响, 通过调整激光触发能量分组对开关的时间参数进行测试。

表 3 为 266 nm 与 532 nm 两种波长的聚焦激光入射到样管后的时间参数。其中 τ_{delay} 为阳极着火延迟时间, τ_{jitter} 为阳极着火延迟时间的差异, 定义为时间跳动, 当入射激光能量达到 8 mJ 时, 开关的时间跳动均小于 1 ns。对比激光触发时间参数可以发现, 相同能量的 266 nm 激光比 532 nm 激光的阳极着火延迟时间和时间跳动要低得多, 266 nm 激光触发能量阈值 $E_0 \leq 4$ mJ, 而 532 nm 激光触发能量阈值 $E_0 \leq 6$ mJ。这是由于氢气更容易在近紫外波段被电离, 因此 266 nm 激光触发能量阈值低, 光电离效率高, 阳极着火延迟时间与时间跳动小。

表 3 聚焦激光触发着火延迟时间与时间跳动

Table 3 Delay time and jitter of focusing laser triggering

U_H/V	$ U_a /kV$	λ/nm	E_λ/mJ	τ_{delay}/ns						τ_{jitter}/ns
				1	2	3	4	5	6	
5.4	15	266	4	310	310	360	410	460	530	210
			6	240	260	250	260	240	240	20
			8	190	190	190	190	190	190	<1
			10	180	180	180	180	180	180	<1
		532	4	1 920	2 220	1 760	1 110	1 260	1 720	1 110
			6	290	270	270	300	300	290	30
			8	240	240	240	240	240	240	<1
			10	240	240	240	240	240	240	<1

3 结 论

本文分别采用波长 266 nm 激光和 532 nm 激光对伪火花开关进行触发可行性实验, 并通过调整伪火花开关的储能器电压测得了系列的数据; 非聚焦工作模式下, 最低激光触发能量为 83 mJ; 聚焦工作模式下, 最低激光触发能量为 6 mJ; 当激光触发能量为 8 mJ 时, 时间跳动 < 1 ns。此次实验验证了激光触发伪火花开关的可行性。后续将采用电子逸出功 3 eV 的金属光电阴极, 并优化金属光电阴极及空心阴极的结构, 以此进一步降低激光触发所需的能量。

致 谢 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所黄子平技术团队及西北核技术研究所黄珂技术团队给予的指导和帮助。

参 考 文 献:

- [1] 王莹, 孙元章, 阮江军, 等. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. (Wang Ying, Sun Yuanzhang, Ruan Jiangjun, et al. Pulse power science and technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (Liu Xisan. High power pulse technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995)
- [3] Chen H, Jiang C, Kuthi A, et al. An ultra compact back-lighted thyratron for nanosecond switching applications[J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulators, 2009, 16(3): 1043-1047.
- [4] Jiang C, Kuthi A, Eccles B, et al. Small BLT switches for compact pulsed power applications[C]//International Power Modulator Symposium. 2004: 181-183.
- [5] Sozer B E, Jiang C, Gundersen A M. Investigation of UV LEDs for compact back-lighted thyratron triggering[C]//Digest of Technical Papers for 17th IEEE International Pulsed Power Conference. 2009.
- [6] 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): 38-42. (Luan Xiaoyan, Zhang Ming, Zhou Liang. A novel large current pulse modulation device—Pseudospark[J]. Vacuum Electronics Technology, 2012(5): 38-42)
- [7] 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): 32-37. (Luan Xiaoyan, Zhang Ming, Zhou Liang. Test and research on the trigger material of the double-gap pseudospark switch along the surface discharge[J]. Vacuum Electronics Technology, 2014(2): 32-37)
- [8] 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. (Zhang Ming, Zhou Liang, Luan Xiaoyan, et al. Test and research of pseudospark switch large capacitance pulse discharge[J]. Vacuum Electronics Technology, 2017(4): 30-34)
- [9] Mechtersheimer G, Kohler R, Lasser T, et al. High repetition rate, fast current rise, pseudo-spark switch[J]. Phys E: Sci Instrum, 1986, 19(6): 466-467.
- [10] Boeuf P J, Pitchford C L. Pseudospark discharges via computer simulation[J]. IEEE Trans Plasma Science, 1991, 19(2): 286-296.
- [11] 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.
- [12] Frank K, Urban J, Bickes C, et al. Mechanism of the pseudospark initiation for the switches with a trigger unit based on flashover[J]. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000, 1: 331-334.