

激光触发火花间隙开关的触发机理与实验性能研究

史杰敏¹, 刘永宏^{1*}, 郑晓鸣¹, 张 臣¹, 崔志强¹, 袁东方¹, 邵永刚¹, 王铁军^{1,2}

¹上海科技大学终极能源中心, 上海

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月24日

摘 要

激光触发火花间隙开关具有延时短、抖动低、同步性能好等优点, 是磁惯性约束聚变中同轴等离子体枪的核心部件。本文系统研究了该开关的触发机理、实验平台及性能表征方法。基于气体放电理论, 分析了激光场电离替代随机本底辐射产生初始电子的物理机制。搭建了以Nimma-600激光器、30 kV高压电源及罗氏线圈为核心的实验平台, 采用尖-平板钨电极结构和高密度聚乙烯腔体。在氩气和氮气环境下开展了系统实验, 研究了激光波长、能量、气压和电压对开关延时与抖动的影响。结果表明: 在氩气环境下, 开关抖动可控制在30 ns以内; 在氮气环境下, 采用532 nm激光(100 mJ)时, 开关在0.6 bar、15 kV条件下的抖动低至14.22 ns。随着激光能量增加, 开关延时与抖动均减小, 但存在一定的饱和效应; 气压升高会导致延时与抖动增大。本文研究结果可为多路同步触发技术及同轴等离子体枪的工程应用提供技术支撑。

关键词

PJMIF, 激光触发火花间隙开关, 延时, 抖动, 气体放电

Study on the Triggering Mechanism and Experimental Performance of Laser-Triggered Spark Gap Switches

Jiemin Shi¹, Yonghong Liu^{1*}, Xiaoming Zheng¹, Chen Zhang¹, Zhiqiang Cui¹, Dongfang Yuan¹, Yonggang Shao¹, Tiejun Wang^{1,2}

¹Center for Ultimate Energy, ShanghaiTech University, Shanghai

²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 史杰敏, 刘永宏, 郑晓鸣, 张臣, 崔志强, 袁东方, 邵永刚, 王铁军. 激光触发火花间隙开关的触发机理与实验性能研究[J]. 应用物理, 2026, 16(6): 692-702. DOI: 10.12677/app.2026.166063

Abstract

Laser-triggered spark gap switches offer advantages such as short delay times, low jitter and excellent synchronization performance. This makes them a core component of coaxial plasma guns used in magnetic inertial confinement fusion. This paper systematically investigates the triggering mechanism, the experimental platform and the performance characterization methods of this switch. Based on gas discharge theory, the physical mechanism by which laser field ionization replaces random background radiation to generate initial electrons is analyzed. An experimental platform centered on a Nimma-600 laser, a 30 kV high-voltage power supply and a Ross coil was constructed, utilizing a pointed-flat tungsten electrode structure and a high-density polyethylene chamber. System experiments were conducted in argon and nitrogen atmospheres to investigate the effects of laser wavelength, energy, gas pressure and voltage on switch delay and jitter. The results indicate that, under argon conditions, switching jitter can be controlled to within 30 ns. Under nitrogen conditions and using a 532 nm laser (100 mJ), switching jitter was found to be as low as 14.22 ns at 0.6 bar and 15 kV. As laser energy increases, both switching delay and jitter decrease, though a saturation effect is observed at a certain point. An increase in gas pressure leads to increased delay and jitter. The findings of this study provide technical support for the engineering applications of multi-channel synchronous triggering technology and coaxial plasma guns.

Keywords

PJMIF, Laser-Triggered Spark Gap Switch, Delay, Jitter, Gas Discharge

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁惯性约束聚变[1] [2] (Plasma-jet-driven Magneto-Inertial Fusion, PJMIF)是实现可控核聚变的一种创新途径。该方案结合了磁约束聚变[3] (Magnetic Confinement Fusion, MCF)和惯性约束聚变[3] [4] (Inertial Confinement Fusion, ICF)的优点,为聚变能实现提供了新的可能[2]-[6]。该方案有望在中等密度、尺寸和约束时间条件下实现点火,且装置造价相比主流方案可降低1~2个数量级,对能源结构转型和实现碳中和战略目标具有重要意义。

PJMIF 路线首先由磁化等离子体射流在中心形成磁化靶,随后利用多束等离子体射流在其外侧形成类球形衬套并向内压缩,使中心磁化靶内爆。激光触发开关是形成等离子体射流的同轴等离子体枪中的关键器件,也是构建等离子体射流驱动磁惯性约束聚变实验装置的核心部件之一。在高压系统中,气体火花间隙开关应用最为广泛,其常见触发方式包括无源自击穿、电触发和光触发[7]。与无源自击穿和电触发方式,光触发具有触发精准可控、击穿延时短、抖动小等优点[8]。在上海科技大学主导的等离子体射流驱动同轴等离子体枪研究中,首要目标是实现多支同轴等离子体枪的同步发射,以形成均匀等离子体衬套并完成压缩内爆,这对触发开关的延时和抖动提出了严苛要求。

本文系统获得了激光触发火花间隙开关在氩气(1.5~2.5 bar)和氮气(0.6~0.85 bar)环境下的延时与抖动特性。实验结果表明:在氩气 2.0 bar、5 kV 条件下,开关抖动低于 30 ns;在氮气 0.6 bar、15 kV、532 nm

激光(100 mJ)条件下, 抖动低至 14.22 ns, 验证了该技术能够满足磁惯性约束聚变装置对多路同步触发开关的工程需求。在 1064 nm 和 532 nm 两种波长条件下, 当激光能量超过 15~20 mJ 后, 进一步增加能量对抖动性能的改善趋于饱和, 揭示了开关实现低抖动运行对激光能量的阈值需求, 并为同轴等离子体枪的优化提供了实验依据。上述结果为激光触发开关在同轴等离子体枪中的工程应用提供了关键技术支持。

2. 触发物理机制

在传统自持放电理论中, 气体击穿通常经历初始电子产生、电子雪崩形成和流注发展三个阶段[9]-[11], 经典流注理论适用于无预电离或低本底电离情形。传统自击穿开关中的初始电子主要来源于宇宙射线等随机本底辐射。根据 Saha 方程[12], 在室温、1.0 bar 条件下, N_2 、Ar 等气体的电离度极低, 随机带电粒子的能量通常低于气体电离能, 需经外加电场加速后方可参与初始电子的形成。该随机机制是导致开关延时与抖动的重要根源。对于激光触发火花间隙开关, 初始电子主要由激光致使电离产生, 替代了随机本底辐射电离过程, 从而显著降低了导通延时和闭合抖动。

在激光触发开关中, 高功率脉冲激光聚焦于电极间隙, 通过多光子电离直接电离气体原子或分子, 形成初始等离子体。由此产生的初始电子具有密度高、空间位置可控和时间同步性好等特点。其中, 初始电子的空间位置由激光焦点决定, 时间同步性则由激光脉宽决定, 可达到皮秒至纳秒量级, 从而为后续雪崩电离提供了确定性的起始条件。

气体电离过程主要以碰撞电离为主, 激光预电离产生的初始电子在强电场中被加速与中性原子发生碰撞, 电子数目呈指数增长, 进而形成电子雪崩。电离系数 α 表示电子沿电场方向单位行程内平均产生的碰撞电离次数。电子雪崩阶段属于非自持放电阶段, 到达阳极的电流可表示为:

$$i_e = i_{e0} e^{\alpha d} \quad (1)$$

其中, i_{e0} 为初始电流, d 为电极间距。进一步考虑二次电子发射(γ 过程)后, 自持放电条件可写为:

$$\alpha d = \ln(1/\gamma + 1) \quad (2)$$

流注理论适用于气压与电极间距的乘积大于 266 Pa·m, 激光触发开关的放电过程仍可由流注理论描述, 但其电子雪崩的起始位置由激光焦点精确控制, 电子雪崩头部到达阳极后, 电子迅速被中和, 残余正离子引起局部电场畸变并进一步增强电场, 同时发射光子诱发光电离, 产生二次电子雪崩, 这些二次电子雪崩与正空间电荷区相互汇合, 最终形成流注通道, 使电极间隙完全导通。

综上所述, 激光触发开关中的初始电子由激光场电离直接产生, 具有确定的时间和空间分布, 替代了经典流注理论中随机初始电子的产生过程。这是激光触发火花间隙开关实现低延时、低抖动和高同步精度的理论基础。

3. 影响延迟抖动的关键因素

在激光触发火花间隙开关的流注放电延迟分为统计延迟和放电发展延迟。统计延迟从外加电压达到直流击穿电压时刻起, 到产生能引起碰撞电离并最终导致击穿的有效电子时刻为止所需要的时间。触发电子在电场作用下通过碰撞电离、光电离等机制使放电通道发展, 最终导致间隙击穿。在均匀电场、短间隙($d_{\text{间隙}} < 1 \text{ cm}$)条件下, 统计延迟较长。

在流注放电理论中, 延迟主要是考虑电子崩的形成以及流注在两极形成的时间, 一般用 $\alpha x_c = 20$ 的数值认为已经达到了流注理论的自持放电条件[13]。

$$t_d = \frac{\ln n_c - \ln n_0}{v\alpha} + \frac{d - x_c}{S} \quad (3)$$

n_0 为激光打入间隙的初始电子数目, v 为电子漂移速度, 约为 10^5 m/s, S 为流注速度, 大概在 10^6 m/s, d 是间隙长度, x_c 为形成流注时电子崩头部的位置。当激光产生等离子体时, 电子数目增加, 此时延迟变小。 t_d 还与 va 有关, 在文献[14]给出了不同气体种类对延迟的影响, 从表 1 可以得到, 氩气环境下的开关延迟最短, 氮气的延迟最长。

Table 1. Effect of different gas types on time delay

表 1. 不同气体种类对时延的影响

气体	$1/va$	E/p
N ₂	130	(22.8 KV/cm)/0.1 Mpa
Air	50	
O ₂	7.7	
Ar	4.3	

3.1. 激光参数

在激光触发火花间隙开关过程中初始种子电子的电离密度 N_0 强烈依赖电极表面的功率密度, 而激光的功率密度又取决于激光能量、脉宽、波长、光束发散角和透镜焦距等光束特性[14]。

早在 20 世纪 70 年代, J. R. Bettis 和 A. H. Guenther [15] 就激光特性对开关放电延迟做了系统的研究。研究结果表明提高电极间隙中的激光功率密度, 从而会增大开关间隙中的电离密度 N_0 , 最后会使时间延迟缩短, 抖动降低。

对激光在焦点处功率密度可依下式计算

$$I_{\text{focus}} = \frac{4E_{\text{laser}}}{\pi f^2 \theta^2 \tau_{\text{laser}}} \quad (4)$$

E_{laser} 为激光能量, τ_{laser} 为激光脉冲宽度, θ 为激光束发散角(半角)。

根据文献[13]的公式, 空气击穿所需要的激光强度为

$$I_{\text{击穿}} = \frac{8 \times 10^6}{P t_p \lambda^2} \left(1 + 4.5 \times 10^{-6} P^2 \lambda^2 \right) \left(1 + 0.08 \frac{t_p}{P d^2} \right) \quad (5)$$

$I_{\text{击穿}}$ 的单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 波长 λ 的单位是 μm , t_p 单位为 s。P 的单位为大气压。

由击穿公式来看, 击穿值与气压, 激光脉冲时间, 激光波长的平方成反比关系, 由于实验波长和激光脉冲由激光器确定, 因此时间延迟最大的影响因素是实验所用气压。激光在焦点处功率密度最大的影响因素是激光能量。

3.2. 工作电压、气体介质、压力与间隙

在激光能量和其他参数固定的情况下, 提高工作电压可以增强电场强度, 从而更有效地加速激光产生的初始种子电子, 加快放电通道的形成, 有效减小开关的时间延迟和抖动。然而, 当激光触发能量足够高, 能够产生充足且稳定的初始等离子体时, 工作电压变化对延迟和抖动的影响将减弱。

环境气体也是影响激光触发开关性能与寿命的核心因素, 其影响主要体现在气体种类、气压、湿度和放电产物等多个方面。气体种类决定了开关的绝缘强度、击穿特性和触发所需的激光能量。1987 年, 美国华盛顿 Spectra Technology 股份有限公司的 W. D. Kimura 和 M. J. Kushner 等研究人员[16]通过实验

成功验证了空气, 氩气, 甲烷, 氢气, 氦气, 氮气, 六氟化硫和氙气等 20 种不同气体环境中激光触发火花间隙开关的特性。由于不同气体具有不同的绝缘强度和电离击穿阈值, 它们可应用于不同的场景。例如, 在相同的气压下, SF_6 的自击穿电压约为 N_2 的 2 倍, 表明 SF_6 的绝缘性能更强, 适合高压应用。相反, Ar 的自击穿阈值低于氮气, 因此适合低压应用。同时, 实验结果表明, 激光触发火花间隙开关的时间延迟和抖动与气体介质电离的难易程度密切相关。

此外, 激光触发火花间隙开关的压力与间隙距离共同显著影响开关的自击穿电压、触发时间延时及抖动。二者的乘积决定了气体间隙的击穿电压, 帕邢曲线则描述了三者之间的关系。不同气体的帕邢曲线各异。如图 1 所示的 Ar 和 N_2 的帕邢曲线, 在最小击穿电压点的左侧, 对应汤森放电区域。在帕邢曲线的右侧, 对于同样的间隙 - 气压的乘积, 氩气所需的击穿电压低于氮气, 即氮气的绝缘性优于氩气。实验所选用的气体和间隙在曲线的右侧。模型适用于静态、均匀电场、直流或工频、中高气压条件下, 预测和对比不同气体(如 Ar 和 N_2)的自持击穿电压。

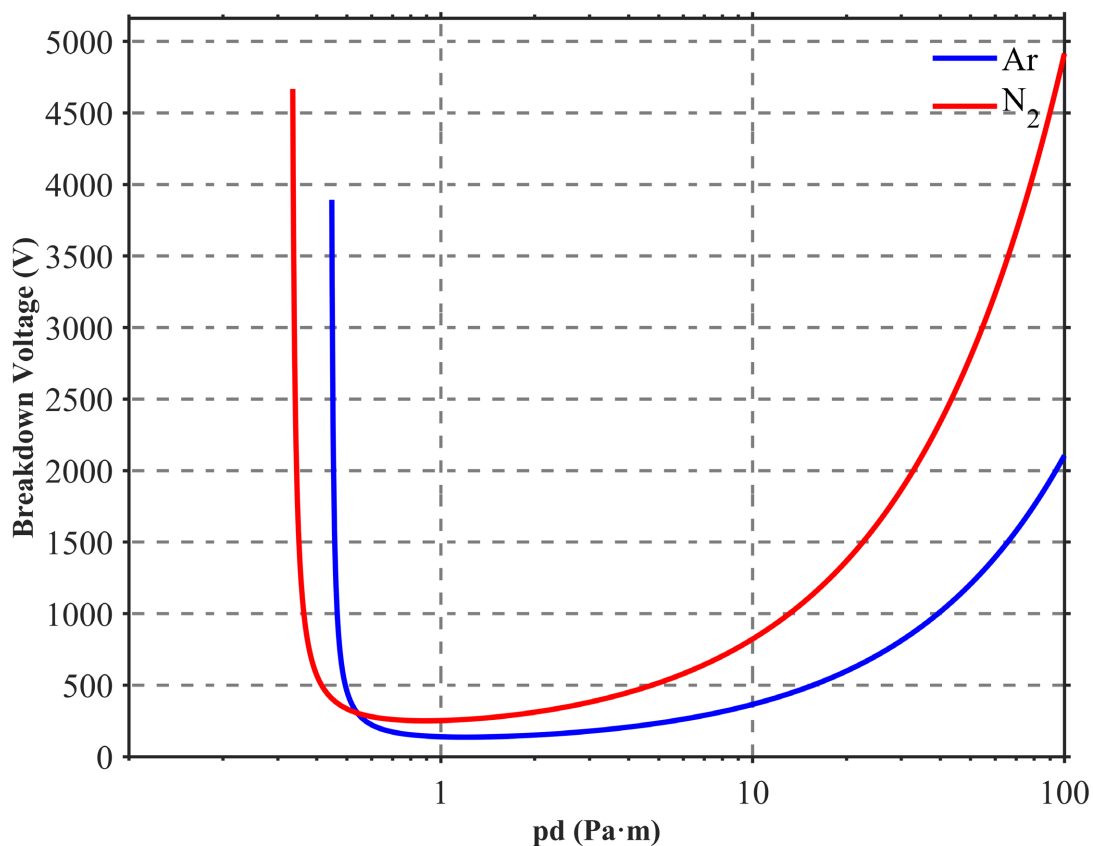


Figure 1. Breakdown voltage curves for Ar and N_2

图 1. Ar 和 N_2 的击穿电压曲线

4. 实验平台与测试方法

激光触发开关实验平台的整体结构如图 2 所示。高压电源最大输出电压为 30 kV, 超级电容器容值为 101.2 μF , 保护电阻 $R_1 \sim R_4$ 均为 2 k Ω 。充电开关由晶闸管构成, 当主电容电压 U_c 低于 U_{set} 预设值且外部使能信号有效时, 晶闸管触发导通; 当充电电流自然过零并低于维持电流阈值后, 充电开关自动断开。充电回路中串联的继电器作为隔离开关, 仅用于待机或维护状态下的物理隔离, 不参与周期性通断控制。

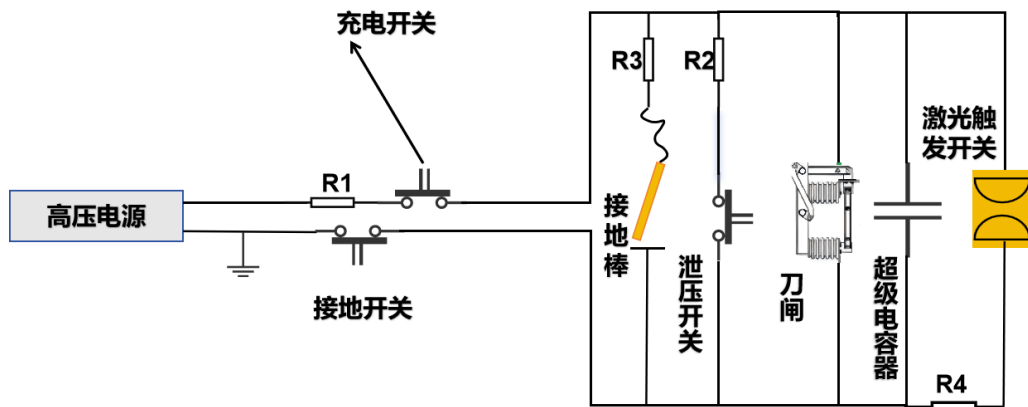


Figure 2. Schematic diagram of a laser-triggered switch platform circuit
图 2. 激光触发开关平台电路示意图

激光器采用镭宝 Nimma-600，可输出 1064 nm 基频激光，并可倍频至 532 nm 和 355 nm。该激光器采用主动调 Q 技术，脉宽不大于 9 ns，峰值功率达数十兆瓦，支持内触发(1~10 Hz)和外触发(≤ 10 Hz 或单次)两种工作模式。氙灯与 Q 开关之间的延时固定为 200 μ s，532 nm 和 1064 nm 激光脉冲抖动均不超过 2 ns，其主要参数见表 2。

Table 2. Nimma-600 laser specifications
表 2. Nimma-600 激光器参数

型号	波长/nm	能量/mJ	能量稳定性	脉宽/ns	频率/Hz
Nimma-600	1064	650	$\leq 0.7\%$	≤ 8	1~10
	532	350	$\leq 1.5\%$	≤ 9	

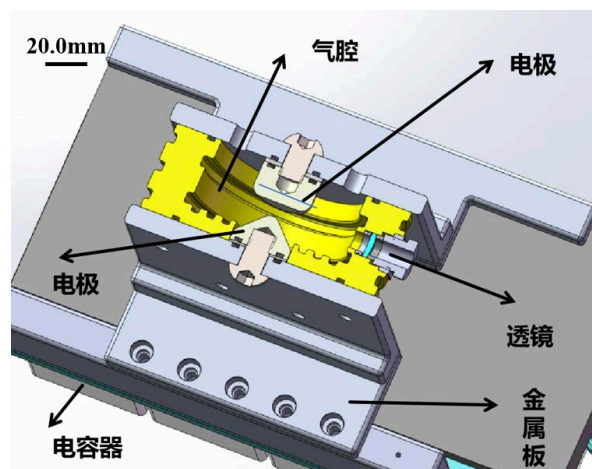


Figure 3. Schematic diagram of the internal structure of a laser-triggered switch
图 3. 激光触发开关内部结构示意图

激光触发开关内部结构如图 3 所示，采用垂直于电极轴方向的侧向触发方式，激光经焦距为 50 mm 的平凸透镜聚焦后进入电极间隙，未聚焦条件下，所需激光能量显著升高，且延时与抖动增大，因此聚焦设计是实现低抖动触发的关键[17]。电极采用“尖-平”针板结构，下电极为锥形钨针，连接电容器负

极高压端；上电极为圆柱形钨板，连接接地端。下电极尺寸为端面直径 30 mm、高度 18 mm、顶部凹槽圆角半径 5 mm、锥角 45°；上电极尺寸为直径 30 mm、高度 17 mm、前缘凹槽圆角半径 5 mm。开关腔体为圆柱形 HDPE 绝缘结构，直径为 123 mm，高度为 45 mm；侧面窗口由平凸透镜密封，内部设置凹凸槽结构以增大爬电距离。本文将延时定义为激光脉冲到开关放电起始时刻之间的时间差，抖动定义为延时的标准差[17]。

本文激光能量由能量计(Ophir Vega 7Z01560, 配 PE50BF-DIFH-C 探头)测量。实验中的电压信号均通过 50 Ω RG58 BNC 同轴电缆及 50 Ω 匹配电阻接入数字示波器进行采集，示波器带宽为 200 MHz，最大采样率为 6.25 GHz/s，开关导通电流信号由校准后的罗氏线圈记录。此外，为保证测量精度，所有测量通道在实验前均进行了时序同步校准，以准确扣除各信号之间的固定时间延迟；同时，每组实验条件下重复测量不少于 5 次，以降低随机误差对抖动统计结果的影响。

5. 实验结果与分析

5.1. 激光触发开关实验光路

实验光路如图 4 所示。激光脉冲由 DG645 数字时序控制器同步触发固体激光器输出，输出激光首先经过半波片与偏振分束棱镜组合，通过旋转半波片调节偏振方向，实现激光能量的连续衰减控制。随后，激光经焦距为 50 mm 的平凸透镜聚焦，以垂直方向入射至激光触发开关气体腔室内，焦点定位于电极间隙预设位置。开关放电产生的电流信号由罗氏线圈记录并转换为电压信号，经同轴电缆传输至示波器进行记录。开关侧面设有激光收集器，用于吸收经偏振分束棱镜后的剩余激光。整套光路中，所有光学元件均固定于精密光学平台上，光路高度经水平仪校准，以确保激光脉冲中心与开关透镜焦点处于同一水平面，满足聚焦精度要求。最终由测得波形分析获得开关的延时与抖动参数。以罗氏线圈输出波形峰值幅度的 10% 作为时间终点。时间起点依据延时量级确定：当延时约为 1000 ns 以上时，以 DG645 触发信号为起点；当延时约为几百 ns 时，以激光触发的 PD 信号为起点。两者与终点的时间差分别记为对应条件下的延时时间。

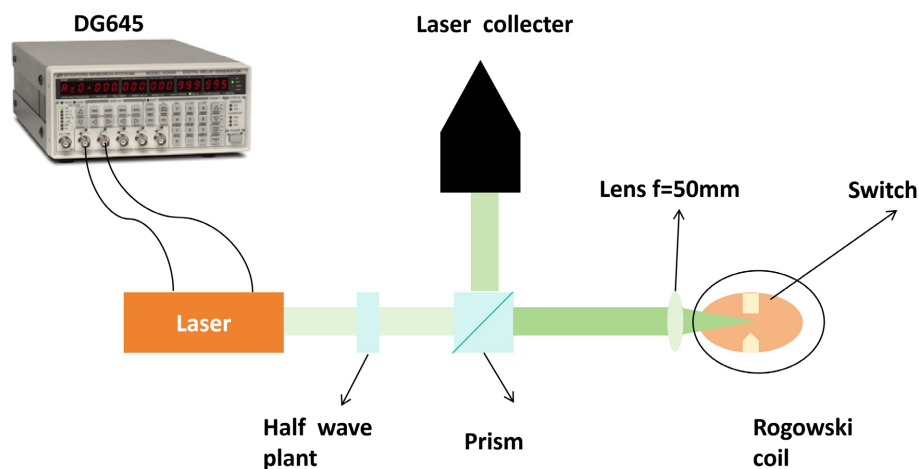


Figure 4. Optical diagram for the laser-triggered switch experiment

图 4. 激光触发开关实验光路图

5.2. 氩气模式

为系统评估激光触发火花间隙开关在同轴等离子体枪中的应用性能，实验采用 1064 nm 激光脉冲，

固定电极间距为 8 mm，激光焦点距尖电极 4 mm。在激光能量为 37 mJ 条件下，分别在表压 1.5 bar、2.0 bar、2.5 bar 以及充电电压 4 kV、5 kV 条件下测量开关的延时与抖动特性，每个条件重复测量五次，测试结果的平均值如图 5 所示。使用气体为氩气，纯度为 99.999% (上海申中气体有限公司)。

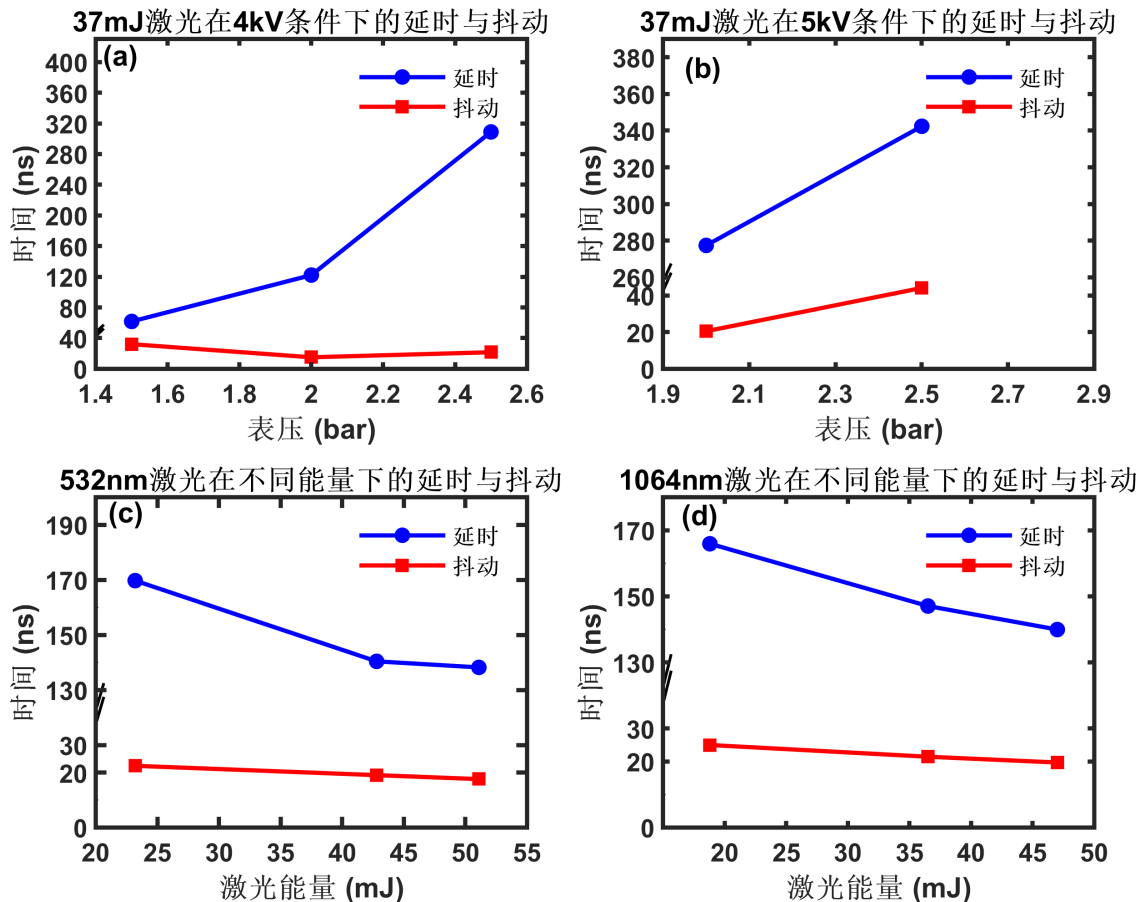


Figure 5. Test results for the argon-mode laser trigger switch
图 5. 氩气模式激光触发开关实验测试结果

实验结果表明，开关触发延时随气压升高而增加。在 5 kV 充电电压下，表压 2.0 bar 时抖动较小；在 4 kV 条件下，同样在表压 2.0 bar 时获得最小抖动为 15 ns。其余测试条件下，开关抖动均小于 30 ns，满足多路同步触发的基本要求。需要指出的是，受限于当前考察的电压和气压范围，激光开关延时及抖动与欠压比之间的定量关系仍有待进一步系统研究。

为对比基频与二倍频激光对开关触发性能的影响，分别在 1064 nm 和 532 nm 两种波长条件下，测试激光脉冲能量在 15~55 mJ 范围内变化时开关延时与抖动的响应规律。具体实验参数设置如下：在 1064 nm 激光工况下，间隙施加电压为 5 kV，背景气压为 2 bar (表压)，电极间距为 8 mm，激光聚焦光斑距尖电极表面 4 mm；在 532 nm 激光工况下，间隙施加电压同样为 5 kV，背景气压同样为 2 bar (表压)，电极间距调整为 8 mm，激光聚焦光斑距尖电极表面仍为 4 mm。上述实验均在氩气环境中进行，激光脉宽为 7~12 ns，测试结果(图 5)表明在两种波长条件下，开关延时与抖动均随激光能量增加而减小。当激光能量超过 15 mJ 后，进一步增大能量对抖动的改善效果趋于饱和。在所有测试条件下，开关抖动均小于 30 ns，表明该系统已实现纳秒量级的触发精度与较好的运行稳定性。

5.3. 氮气模式

为扩展激光触发开关的工作范围, 满足不同同轴等离子体枪的实际应用需求, 实验采用更换填充气体的方法进行研究。考虑到氮气的电离能高于氩气、电离难度更大, 实验中采用 30 kV 电源供电, 实验采用 1064 nm 和 532 nm 两种波长激光, 电极间距调整为 6 mm, 激光焦点距负高压(-15 kV)尖电极 4 mm。532 nm 激光能量为 100 mJ, 1064 nm 激光能量为 220 mJ。分别在表压 0.6 bar 和 0.85 bar 条件下测量开关延时与抖动。使用气体为氩气, 纯度 99.999% (上海伟创标准气体分析技术有限公司)

氮气模式下激光触发开关的测试结果如图 6 所示, 实验结果表明, 在相同波长下, 气压升高会导致延时增加, 抖动亦呈增大趋势。不同波长下的抖动结果如表 3 所示, 由此可见, 在较高激光能量条件下, 532 nm 与 1064 nm 激光触发时的抖动均可控制在 40 ns 以下。其中, 1064 nm 激光在 0.6~0.85 bar 范围内的抖动随表压变化不显著。在 15 kV 条件下, 0.6 bar 对应较高的欠压比, 有利于降低抖动。

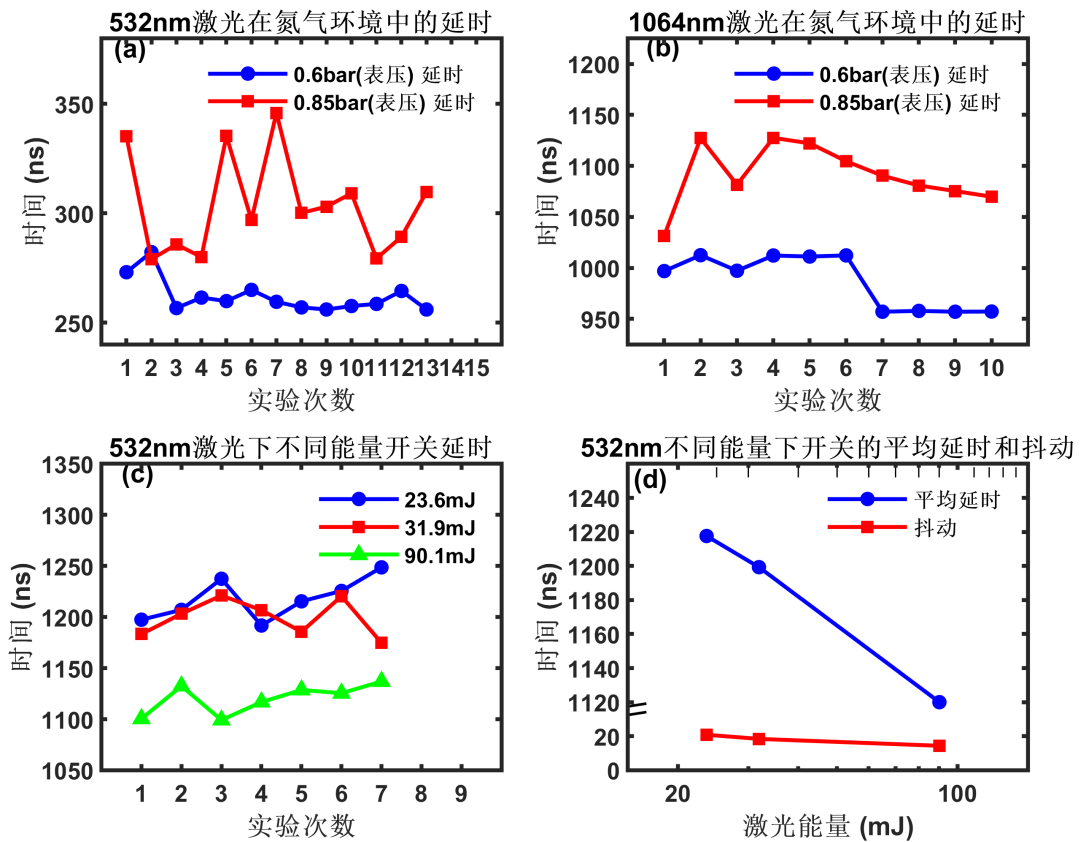


Figure 6. Test results for the nitrogen-mode laser trigger switch
图 6. 氮气模式激光触发开关实验测试结果

进一步采用 532 nm 激光, 在电压 15 kV、表压 0.6 bar、电极间距 6 mm、激光焦点距尖电极 4 mm 条件下, 改变激光能量(20~100 mJ), 测量开关延时与抖动, 结果如图 6(c)和图 6(d)所示。实验结果表明, 随着触发激光能量密度增加, 开关导通延时呈单调递减趋势, 闭合时刻抖动亦同步降低。这一现象可归因于激光电离产生的初始等离子体通道电子密度升高, 从而缩短了流注形成所需的统计时延。当激光能量超过等离子体通道完全电离所对应的阈值后, 延时与抖动均趋于饱和, 最终稳定在某一极小值附近。在 20~100 mJ 范围内, 开关抖动均小于 25 ns。

Table 3. Laser-triggered switch jitter under different parameters
表 3. 不同参数下激光触发开关抖动

气压/bar	充电电压/kV	激光波长/nm	激光能量/mJ	电极间距/mm	抖动/ns
0.60	15	532	100	6	14.22
0.85	15	532	100	6	22.72
0.60	15	1064	220	6	26.31
0.85	15	1064	220	6	30.23

在初始电子产生到雪崩击穿过程中, 延时时间主要由初始电子产生时间和雪崩发展时间构成。随着激光能量增加, 初始电子密度升高, 雪崩建立时间缩短, 因此开关延时和抖动均呈现下降趋势。然而, 当激光能量高到一定程度后, 初始电子已接近饱和, 进一步增加能量对延时的改善效果趋于饱和——这一趋势与本文实验结果吻合。

6. 结论

本文围绕同轴等离子体枪多路同步触发需求, 系统研究了激光触发火花间隙开关在不同气体环境下的延时与抖动特性, 分析了气压、激光波长、激光能量及充电电压等参数对开关性能的影响规律。结果表明: 在氩气环境中, 开关触发延时随气压升高而增加, 在 4 kV 和 5 kV 条件下, 表压 2.0 bar 时均获得较优抖动性能, 其中最小抖动为 15 ns, 且在不同波长和能量条件下抖动均小于 30 ns; 在氮气环境中, 由于电离能较高, 需提高激光能量和充电电压, 其中 532 nm 激光在 100 mJ、0.60 bar、15 kV 条件下抖动低至 14.22 ns, 1064 nm 激光在 220 mJ、相同气压条件下抖动为 26.31 ns。总体而言, 随着激光能量增加, 开关延时与抖动均减小, 但在较高能量密度下改善效果趋于饱和。研究结果表明, 激光触发火花间隙开关在氩气和氮气环境下均可实现纳秒量级低抖动触发, 能够满足同轴等离子体枪多路同步触发的应用需求, 并为后续多路集成触发实验及 PJMIF 相关工程应用提供了技术基础。

基金项目

国家发改委重大科技基础设施项目(批准号: 2208-000000-04-01-249628)和上海市科技计划项目(批准号: 21511105000)资助。

参考文献

- [1] Kirkpatrick, R.C., Lindemuth, I.R. and Ward, M.S. (1995) Magnetized Target Fusion: An Overview. *Fusion Technology*, **27**, 201-214. <https://doi.org/10.13182/FST95-A30382>
- [2] Lindemuth, I.R. (2015) The Ignition Design Space of Magnetized Target Fusion. *Physics of Plasmas*, **22**, Article 122712. <https://doi.org/10.1063/1.4937371>
- [3] Hsu, S.C. and Langendorf, S.J. (2019) Magnetized Plasma Target for Plasma-Jet-Driven Magneto-Inertial Fusion. *Journal of Fusion Energy*, **38**, 182-198. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0168-z>
- [4] 王志斌, 沈场, 余羿, 等. 我国磁约束核聚变能源的发展路径, 国际合作与未来展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-13.
- [5] 张杰. 浅谈惯性约束核聚变[J]. 物理, 1999(3): 142-152.
- [6] Valavanidis, A. (2023) Nuclear Fusion Breakthrough, a Milestone for Future Clean and Limitless Energy Production. In: 2022 Nuclear Fusion Reaction Achieved "Net Positive Energy". Vol. 1, 1-23.
- [7] 耿林, 张忠萍. 国外空间激光应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 919-925.
- [8] 李洪涛, 王玉娟, 夏明鹤, 等. 激光触发多级开关触发延迟及其抖动的研究[J]. 高电压技术, 2006(2): 48-50.
- [9] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

- [10] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高压电工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [11] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995.
- [12] Saha, M.N. (1920) LIII. Ionization in the Solar Chromosphere. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **40**, 472-488. <https://doi.org/10.1080/14786441008636148>
- [13] Fowler, R.H. (1955) *Statistical Mechanics: The Theory of the Properties of Matter in Equilibrium*. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- [14] Guenther, A.H. and Bettis, J.R. (1978) The Laser Triggering of High-Voltage Switches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **11**, 1577-1614. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/11/12/001>
- [15] Bettis, J.R. and Guenther, A.H. (1970) Subnanosecond-Jitter Laser-Triggered Switching at Moderate Repetition Rates. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **6**, 483-491. <https://doi.org/10.1109/JQE.1970.1076510>
- [16] Kimura, W.D., Kushner, M.J. and Seamans, J.F. (1988) Characteristics of a Laser Triggered Spark Gap Using Air, Ar, CH₄, H₂, He, N₂, SF₆, and Xe. *Journal of Applied Physics*, **63**, 1882-1888. <https://doi.org/10.1063/1.339886>
- [17] 殷毅. 折叠型双脉冲-长脉冲调制器及其激光触发技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.