文章编号：1003-1480（2025）05-0018-11

直列式爆炸箔起爆系统用高压开关技术研究进展

韩克华[1]，陶海洋[1]，高 迪[1]，刘云周[2]，杨 康[1]，郭 凯[1]，吴琴钟[1]，艾沛延[1]

（1. 陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061； 2.中国船舶集团有限公司第705研究所，陕西 西安，710077）

摘 要：高压开关作为爆炸箔起爆系统（EFI）的核心组件，直接影响系统的能量释放效率与可靠性。本文从高压开关的性能、分类及原理、集成化工艺 3 个维度综述了研究进展，分析了高压开关的结构设计及关键性能参数，并探讨了其集成化发展趋势。研究表明，气体/真空高压开关具有高耐压和抗辐射能力，但体积较大；半导体固态高压开关响应速度快，适合小型化，但环境适应性较差；集成式平面高压开关通过 MEMS 和 LTCC 工艺实现了高集成度与小型化，但仍需解决寿命和稳定性问题。未来研究应聚焦于耐高温材料与封装技术的开发，推动 MEMS 与 LTCC 工艺的融合，提升开关在极端环境下的可靠性和智能化水平，以满足武器系统和航天器对小型化、高性能火工装置的需求。

关键词：爆炸箔起爆系统；高压开关；爆炸箔起爆器；集成工艺；研究进展

中图分类号：TJ450.3 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.002

Review on High Voltage Switching Technology for In-Line Exploding Foil Initiator Systems

HAN Ke-hua[1], TAO Hai-yang[1], GAO Di[1], LIU Yun-zhou[2], YANG Kang[1], GUO Kai[1], WU Qin-zhong[1], AI Pei-yan[1]

（1.Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute,Xi'an, 710061； 2. The 705 Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Xi'an, 710077）

Abstract： As a core component of an exploding foil initiator (EFI) system, the high-voltage switch directly affects the system's energy release efficiency and reliability. This paper reviews the research progress from three dimensions: the performance, classification,working principles, and integrated manufacturing processes of high-voltage switches. It analyzes the structural design and key performance parameters of high-voltage switches and discusses their integration trends. Research indicates that gas/vacuum high-voltage switches offer high voltage resistance and radiation tolerance but are bulky. Solid-state semiconductor high-voltage switches feature fast response time and are suitable for miniaturization, yet they exhibit poor environmental adaptability. Integrated planar high-voltage switches achieve high integration and miniaturization through MEMS and LTCC processes but still face challenges in lifespan and stability. Future research should focus on developing high-temperature-resistant materials and packaging technologies, promoting the integration of MEMS and LTCC processes, and enhancing the reliability and intelligence of switches in extreme environments to meet the demand of weapon systems and spacecraft for miniaturized,high-performance explosive devices .

Key words：Exploding foil initiator system; High-voltage switch; Exploding foil initiator; Integration technology; Research progress

爆炸箔起爆器（EFIs）通过高压脉冲电流引发金属箔爆炸，从而产生等离子体，进而驱动飞片撞击含能材料以实现起爆或点火，是当前安全性最高的火工品。直列式爆炸箔起爆系统的关键组件包括储能电容、

收稿日期：2025-03-26

作者简介：韩克华（1981-），男，研究员，主要从事直列式爆炸箔起爆和点火技术、高新火工品技术研究。

通讯作者：吴琴钟（1996-），女，工程师，主要从事直列式爆炸箔起爆和点火技术、高新火工品技术研究。

基金项目：国家十四五预研项目（90903050301）。

引用本文：韩克华，陶海洋，高迪，等. 直列式爆炸箔起爆系统用高压开关技术研究进展[J]. 火工品, 2025(5): 18-28.

高压开关及爆炸箔起爆器。高压开关作为核心部件，其性能至关重要，它必须在纳秒级时间内导通高电压（通常数 kV 至数十 kV），以形成可靠的窄脉冲大电流，确保爆炸箔芯片能够发生电爆炸并产生等离子体。此外，高压开关还需满足小型化、低触发阈值和高可靠性的设计要求[1-3]。

气体/真空高压开关以其高耐压、低漏电流和抗辐射能力强等优点最早受到广泛关注，该技术国外研究起步早，技术成熟，如美国雷诺兹公司 1999 年报道的气体放电开关[4]，而国内研究虽起步较晚，但在结构优化和材料改进方面取得了进展。与此同时，半导体固态高压开关技术发展迅速，国外基于硅碳化物（SiC）和镓砷化物（GaAs）材料的研究成果尤为突出，如 1999 年 Tom Nickolin[5]提出金属氧化物半导体（MOS）开关，以及 2001 年金属氧化物半导体场效应晶体管（MCT）开关成功通过 MIL-STD-331 引信环境试验[6-7]。国内南京理工大学朱朋团队[8]2019 年针对 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性开展了研究。在集成式平面高压开关领域，国外对平面火花隙（PTS）和平面电爆炸（PDS）开关的研究已较为深入，而国内近年来在微型化和集成化方面也取得了显著的进展，特别是在微机电系统（MEMS）和低温共烧陶瓷（LTCC）工艺的应用上[9-10]。

尽管如此，当前的研究仍面临诸多挑战。气体/真空高压开关体积较大，制造成本高，难以适应小型化及低成本产品的需求，且其抗力学过载能力较弱。半导体固态高压开关性能易受温度、电磁等环境因素的影响，难以在极端环境下保持稳定性，且其最大额定电压相对较低。在集成式平面高压开关领域，平面火花隙开关的放电寿命较短，稳定性较差，烧蚀问题严重影响其可靠性。尽管 MEMS 和 LTCC 工艺提高了集成度，但多层结构的封装难度较高，且材料的耐高温性能不足。此外，各种类型的开关在高冲击、宽温域等极端环境下的可靠性仍需进一步提高，同时，缺乏智能化触发与状态监测功能，系统安全性待增强。

本文综述了高压开关性能、分类及工作原理、集成化工艺 3 个维度的研究进展，对比分析高压开关的结构设计、关键性能参数以及集成化发展趋势，为直列式爆炸箔起爆系统的小型集成化和低成本研究提供理论参考。

1　高压开关的工作原理与性能要求

1.1　高压开关在爆炸箔起爆系统中的工作原理及要求

高压开关在直列式爆炸箔起爆系统中的电路工作原理框图如图 1 所示。

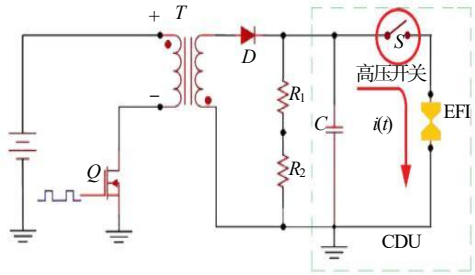


图 1　直列式爆炸箔起爆系统电路原理框图

Fig. 1　Block diagram of the circuit principle of the in-line exploding foil initiator system

在直列式爆炸箔起爆系统中，高压开关与爆炸箔起爆器串联，并与高压脉冲电容器并联，共同构成 RLC 二阶放电电路，亦即电容放电单元（Capacitor Discharge Unit，CDU）。在高压电容器充电阶段，高压开关必须确保可靠截止；而在放电阶段，则需及时且可靠地导通，以控制主放电回路的电流通断。此外，高压开关在导通状态下，需确保放电回路能够迅速形成窄脉冲大电流，保证爆炸箔起爆器的可靠作用。作为直列式爆炸箔起爆系统中的核心关键元器件，高压开关的工作电压范围、稳定性、高关断阻抗以及低导通阻抗特性是保证爆炸箔起爆系统安全性的关键因素。导通时间及导通电阻直接影响爆炸箔电爆炸的电流上升速率，是快速形成窄脉冲大电流以及确保爆炸箔起爆器可靠作用的前提条件，因此对高压开关的性能提出了较高的要求。

1.2　高压开关的核心性能指标

1.2.1　工作电压范围

高压开关的最高额定电压 U_{max} 与工作电压 U_0 的比值，是衡量其工作电压选择范围及稳定性的重要指标。该比值越高，表明设备的工作电压范围越宽广，

从而保障了运行的稳定性和安全性。通常，该比值应不低于 1.5，以满足 GJB/Z35-1993 元器件降额准则[11]中对核心关键器件的 I 级降额设计要求。

1.2.2 安全性及可靠性

在强电磁脉冲、强辐射和杂散电流等极端条件下，爆炸箔起爆系统必须保持稳定运行，这要求高压开关具有较高的安全性能。在系统运作期间，该系统需要承受数千伏的高电压，并确保触发时使上升时间不大于 30~60 ns、峰值电流为 1~7 kA，峰值功率为 1.15 MW 的窄脉冲大电流能够瞬间且可靠地通过。

1.2.3 导通阻抗与关断阻抗

为确保武器系统的高安全性和高可靠性，高压开关必须具备较高的关断阻抗以降低直列式爆炸箔起爆系统漏电流所产生的功耗，同时，更需具备较低的导通阻抗以提升窄脉冲大电流的输出特性。

1.2.4 导通速率

在开关器件的工作过程中，其断态与通态电阻（rk）及其变化速率 drk/dt 是关键参数，而开关时间则是指电阻值从无穷大过渡到无穷小所需的时间。因此，对于高压开关而言，理想状态是开态电阻值趋向于无穷大，通态电阻值趋于无穷小，且电阻变化速率应尽可能高。电阻值的大小及其变化速率共同决定了开关器件的物理接通状态及其演变过程。在爆炸箔起爆系统中，高压开关的性能评估首要关注点应为开关速率，特别是其接通时间应尽可能短。通常，开关的接通时间应小于回路放电时间常数 2~3 个数量级。

1.2.5 导通时间的稳定性

开关器件的导通时间通常表现出一定的波动性，其稳定性受两个主要因素影响：其一为开关通道形成过程的物理机制，此为内在因素；其二为施加于开关以启动其工作的外部条件，此为外在因素。当工作电压趋近于器件的最大额定电压 U_{max} 时，开关时间将缩短，外触发脉冲波形的上升沿越陡峭，符合开关启动的条件越好，导通时间相应减小，其波动性随之降低。

2 高压开关分类与技术原理

高压开关物理参量的动态变化会直接影响爆炸箔起爆器的发火性能，因此，针对爆炸箔起爆系统用高压开关的性能研究已发展成为一个专门的研究领域[4,9-11]。通过综合分析引信年会以及国内外相关文献的报道，可以发现，目前国内外在爆炸箔起爆系统采用的高压开关按照技术原理主要分为传统气体/真空高压开关、固态开关和集成式平面高压开关[12-14]。

2.1 气体/真空高压开关

2.1.1 工作原理与特性

自从 1999 年第 43 届引信年会上美国雷诺兹公司（Reynolds Industries）[4]报道气体放电开关以来，该技术因其闭合速度快、高工作电压、高工作温度、低漏电流和小辐射影响等优点而备受青睐。气体开关的结构及实物如图 2（a）~（c）所示。气体高压开关基于气体放电原理，通过施加高压使电极间气体电离形成导电通道；真空高压开关采用真空触发管结构，利用场致发射效应实现电子雪崩导通，当触发电压达到阈值时，阴极表面产生电子发射场，在真空环境中形成电离离子群和电弧导通路径，如图 2（d）所示。

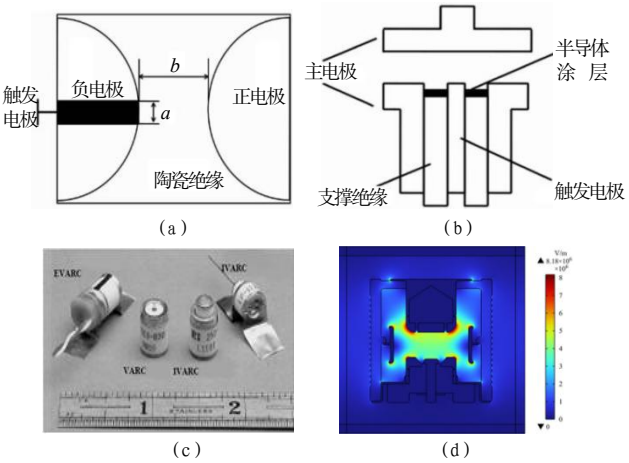


图 2 气体/真空高压开关结构及实物图

Fig. 2 Structure and physical diagram of gas/vacuum high-voltage switch

气体高压开关触发电极位于两个主电极之间，触发电极与负电极的最小间隙距离为 a，两个主电极距离为 b。主电极由球形、半球形或者其他形状的金属制成，开关电极的不同形状、表面粗糙度、光洁度、间隙宽度等将会影响开关的击穿电压、使用寿命等性能。在开关未导通时，两个主电极之间加有一定的电压，当向触发电极施加电压时，触发电极和相邻电极之间的间隙首先被击穿，产生带电粒子，带电粒子在

电场的作用下发生定向运动，造成主电极间隙击穿[15-16]。

2.1.2 优势与局限性

由于其内部结构，气体开关耐压可达 100 kV 以上，典型真空开关耐压 20 ~50 kV，可通过 10~50 kA 的脉冲电流，触发能量为 50~200 mJ。气体开关由于导通过程需要对内部密封的惰性气体进行电离，其导通时间大于 100 ns，可通过提升触发能量和工作电压来提升导通电弧通道，从而降低其导通时间及阻抗参数；真空开关无气体电离过程，其导通时间不大于 5 ns。气体开关和真空开关处于工作状态时，性能不易受到高温、高电压等因素的影响，尤其是后者基本不受强辐射的影响，能够适应恶劣的环境。由于开关是金属陶瓷密封工艺，并且对电极材料的处理工艺要求较高，导致气体开关和真空开关的体积较大、制造成本较高、抗力学过载能力差，应用在小型化和低成本产品中有较大困难。

2.2　半导体固态高压开关

2.2.1 工作原理与特性

目前应用于爆炸箔起爆系统的半导体固态高压开关主要有 3 类：基于 SiC 技术的 MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）场效应晶体管高压开关、绝缘栅双极晶体管 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）高压开关和基于 MOS 控制晶闸管的 MCT（Metal-Oxide-Semiconductor Controlled Thyristor）高压开关。

1999 年 Tom Nickolin[5]在 LEEFI 中提出 MOSFET 高压开关。其利用 SiC 材料特性，通过栅极驱动电压实现电子流动，从而导通开关。此外，还可以采用 GaAs 或 SiC 基片，通过激光触发实现光电导通。IGBT 高压开关在栅极-发射极施加正向电压（通常 $U \geqslant 15$ V）时，形成 MOS 沟道，为 PNP 晶体管提供基底电流，实现开关导通[17-19]。2015 年第 58 届引信年会公布了一种堆栈式 IGBT 高压开关[20]，该开关采用堆栈式绝缘栅双极型晶体管串联组合，其工作原理如图 3 所示。MCT 高压开关是一种结合 MOSFET 和晶闸管特性的器件，用于解决传统晶闸管关断问题，同时保留高压大电流的能力。它通过 MOSFET 控制晶闸管的导通和关断。MCT 分为 P 型和 N 型，具有不同的关断和导通方式。N 型 MCT 开关因其快速闭合特性，常用于爆炸箔起爆系统。N 型半导体开关结构及电路原理示意图如图 4 所示[21-22]。自 2001 年起，MCT 通过了 MIL-STD-331 引信环境试验[6-7]，在多个领域得到应用，包括电子安保系统和低能爆炸箔起爆器，其性能和可靠性得到认可[23-24]。MCT 与气体高压开关照片的对比如图 5 所示。随着技术发展，预计 MCT 等半导体高压开关将替代传统火花隙开关。

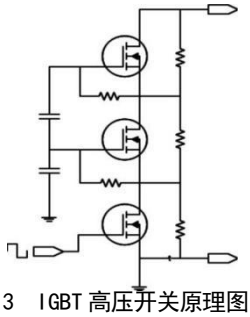


图 3　IGBT 高压开关原理图

Fig. 3　Schematic diagram of IGBT high voltage switch

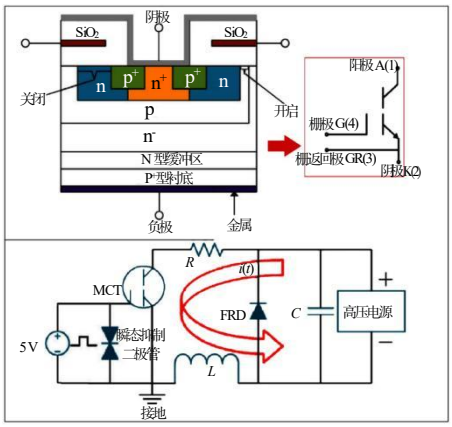


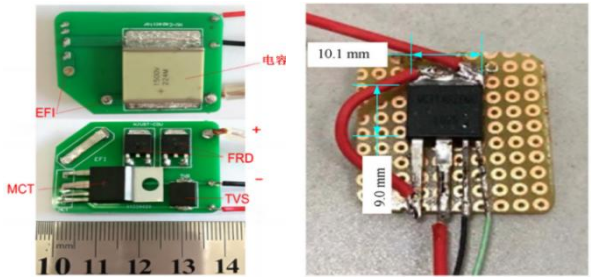
图 4　N 型半导体开关架构及电路原理示意图

Fig. 4　Schematic diagram of N-type semiconductor switching architecture and circuit principle

图 5　半导体 MCT 高压开关与气体高压开关对比

Fig. 5　Comparison of semiconductor MCT high-voltage switch and gas high-voltage switch

国内对半导体固态高压开关的研究起步较晚。2017 年贺思敏等[25]对国外 MCT 和国产陶瓷电容进行了研究，实现了两路冲击片雷管的成功起爆。南京理工大学朱朋团队[8]在 2019 年针对 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性开展了研究，设计并制备出体积较小的 CDU，但其综合性能仍需改进，实物及电路原理如图 6（a）所示。2019 年 Li J[26]提出了一种基于 MOSFET 的驱动电路，提升了 MCT 开关的响应速度和能量转换效率。2024 年沈阳理工大学研究团队[27]开展了 MCT 高压开关在冲击载荷下的特性研究，揭示其机械和电气耦合响应特性及失效机理，实物如图 6（b）所示。



（a） （b）

图 6 MCT 开关电路实物图

Fig. 6 Physical diagram of MCT switching circuit

2.2.2 优势与局限性

MOSFET 高压开关具备快速开关（纳秒级）、低导通电阻和高效率等优点，但其额定工作电压较低、成本高，且驱动设计复杂。IGBT 可实现更高电压，具有简单电压控制和灵活的并联/串联设计，但高压下导通损耗较大，开关电压分配不均，且成本较高，不适用于小型化和低成本需求。

MCT 高压开关采用金属氧化物栅控信号控制，具有高压大电流能力，导通速度快（微秒级），导通损耗低，无需强制换流电路，简化了驱动。但其制造工艺复杂，驱动功率高，最大额定电压低，且性能受环境因素影响较大。由于 MCT 高压开关的核心晶片是基于半导体集成工艺，在 EFIs 的小型集成化技术方面具有广泛的应用前景。

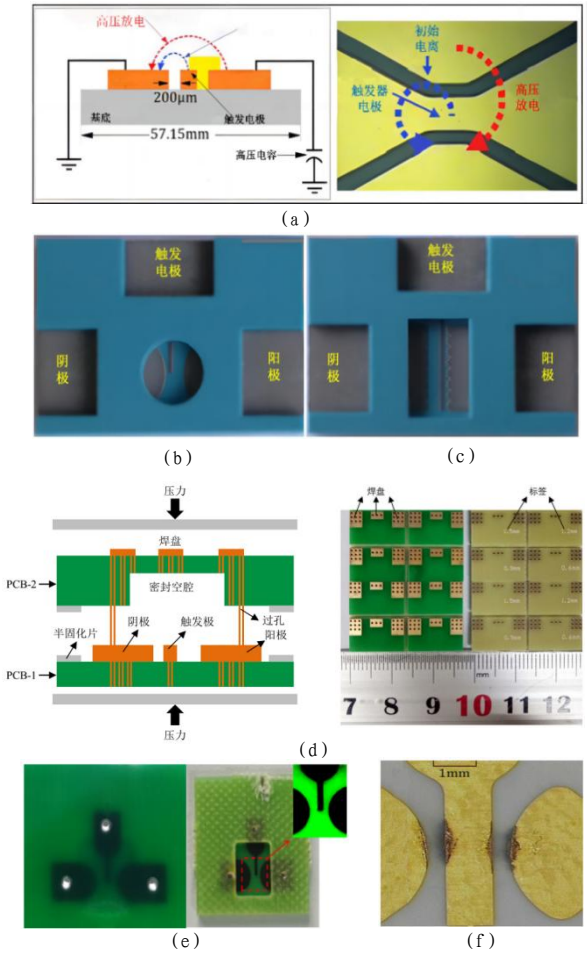
2.3 集成式平面高压开关

2.3.1 工作原理及特性

材料科学和微电子制造技术的进步推动了集成式平面高压开关的开发，这些开关结合了半导体材料和微电子工艺，旨在提高 EFIs 的集成度并降低成本。平面开关分为两类：平面火花隙 PTS 开关和平面电爆炸 PDS 开关。PTS 开关利用空气击穿原理工作，而 PDS 开关则通过触发电极的电爆炸产生高温等离子体来实现导通。

（1）平面火花隙 PTS 高压开关

自 1991 年以来，学者们不断研究平面火花隙 PTS 高压开关，以满足常规弹药发火装置的要求并降低成本[28-30]。2011 年，Baginski T A 等[31]设计了一种含 PI 绝缘层的开关，可集成到传统带状线 CDU 中，减少了发火回路的寄生电感，如图 7（a）所示。



（a） （b） （c） （d） （e） （f）

图 7 平面火花隙 PTS 高压开关

Fig. 7 Planar spark gap PTS high-voltage switch

王桂吉等[32]在 2006 年制备了一种三电极高压开关，其放电回路电感降低、周期缩短、峰值电流增加。2012 年，周镇威等[33]采用表面微加工技术设计了平面火花隙开关，电感为 26.5 nH，电阻为 66 mΩ。2013 年，北京理工大学的 Zeng Q X 等[34]制备了具有多个不同间隙的平面火花隙三电极高压开关，工作电压为

自击穿电压的 70%~90%时，开关延迟短，抖动小，性能稳定。2016 年，李志浩[35]使用环氧树脂作为绝缘填充材料，但开关触发电压减小受阻。2018 年，陈楷等[36]采用 MEMS 工艺和 LTCC 工艺设计了单弧道和多弧道两种结构的平面火花隙三电极高压开关，如图 7（b）~（c）所示，放电性能优于传统火花隙高压开关。2021 年，杨智等[37]采用 PCB 封装了平面三电极空气火花隙开关，如图 7（d）所示，但并对未其动态性能和失效原因研究。2023 年，曹兴等[38]制备了 5 种绝缘间隙的 Cu 电极平面火花隙平面高压开关，研究了导通特性和寿命，发现响应时间随导通次数增加而增大，间隙越大，放电寿命越长，开关实物如图 7（e）所示。Kehua Han 等[39]采用薄膜溅射工艺，在聚酰亚胺基底上制备了平面火花隙 Cu 箔三电极开关，提升了系统集成及力学过载性能，如图 7（f）所示。

（2）平面电爆炸 PDS 高压开关

自 20 世纪 80 年代起，研究者们开始探索聚合物薄膜在冲击下的导电特性，并开发了适用于电子点火系统的平面介质高压放电开关。这些开关在受到高速撞击时，通过电爆炸实现导通[40-41]。Nerheim E[42]设计了基于硅基平面的 PDS 高压开关，利用电爆桥上的非晶硅或多晶硅产生等离子体，瞬间连接绝缘间隙两侧的电极，其结构原理如图 8（a）所示。基于 Kapton 薄膜的肖特基二极管触发 PDS 高压开关[43]结构原理如图 8（b）所示。该 PDS 高压开关由多种材料组成，通过反向电压触发介电层击穿实现导通。

随着技术进步研究者们采用离子刻蚀法制备铜膜单微爆桥平面电爆炸高压放电开关。基于铜膜单微爆桥平面电爆炸高压放电开关原理如图 8（c）所示。南京理工大学的研究团队[44-45]使用 Al/CuO 复合薄膜材料制备了性能更优的单微爆桥平面电爆炸放电开关，其结构如图 8（d）所示。此外，还有研究提出了串联平面电爆炸高压开关的概念[46]，理论上能提高电气性能，结构如图 8（e）所示。2023 年，Kehua Han 等[47]设计了与爆炸桥箔共面共阴极集成的单微爆桥和串联微爆桥结构的平面 PDS 高压开关，显著提升了开关性能，将最大额定电压提升至 3.0 kV 以上，触发电压降低至 600 V，导通时间提升至 100 ns 之内，其结构如图 8（f）所示。

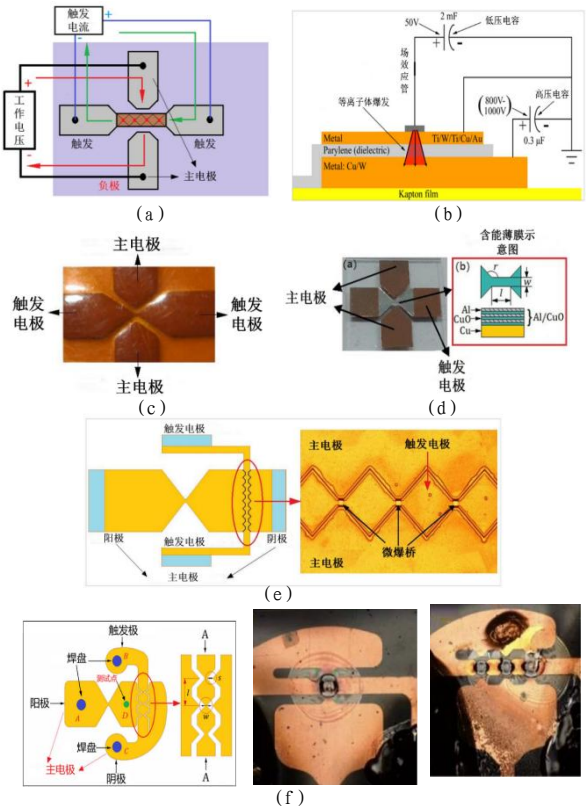


图 8　平面电爆炸 PDS 高压开关

Fig. 8　Planar electric explosion PDS high-voltage switch

2.3.2 优势与局限性

平面火花隙 PTS 和电爆炸 PDS 高压开关相较于传统开关，能实现低成本批量生产，有良好的抗力学过载性能；并且易于与 McEFI 集成，有助于提高集成度，实现小型化、低成本的 EFIs。但是，PTS 开关稳定性较差，多次放电后可能出现烧蚀，影响 EFIs 的可靠性和安全性。相较于 PDS 开关固有的一次性使用特点，在耐烧蚀材料保护下的 PTS 开关可重复使用且不影响作用性能。

3　高压开关的集成化工艺

3.1　MEMS 集成工艺技术

3.1.1 MEMS 工艺技术概述

在火工品领域，MEMS 工艺是指使用微加工技术，如光刻、刻蚀等，来制造微型火工品器件，例如微型起爆器、微型点火器以及微型高压开关等。这些器件

以高精度、快速响应和高能量密度为特点，满足火工品对小型化和高性能的需求。MEMS 工艺最初使用硅片基板，但该工艺采用的阳极键合对组件平整度和精度要求极高。在 MEMS 制备工艺中，磁控溅射薄膜沉积技术是一种常用的气相沉积方法，因其沉积温度低、速度快、薄膜均匀性好等优点，广泛用于多种材料的薄膜制备。

2012 年，周密等[10]通过 MEMS 工艺在聚酰胺薄膜上覆铜，设计了平面高压开关，主电极为半圆形，触发电极为细条状，如图 9（a）所示。2013 年，Zeng Q X 等[34]制备了具有不同间隙的三电极高压开关，如图 9（b）所示。2017 年，Kamal jeet 等[48]采用 MEMS 技术在 Al_2O_3 陶瓷基板上制备了如图 9（c）所示的平面火花隙开关。金属涂层厚度分布为 0.03 μmCr/3 μmCu/1 μmAu，阴阳 2 个主电极直径 4 000 μm，间隙 800 μm，触发电极宽度 140 μm。该开关的静态自击穿电压为 2 800 V。将该结构开关与 EFI 集成在同一陶瓷基板的正反两面上，结构如图 9（d）所示，电性能测试显示 EFI 电爆时峰值电流约 2 000 A，上升时间 t<100 ns。2022 年，Kehua Han 等[39]采用 MEMS 磁控溅射薄膜沉积制备了基于 PTS 开关的一体化集成 EFI，如图 9（e）所示，研究了其静态自击穿特性、动态工作特性及放电寿命特性。2023 年，Kehua Han 等[47]制备了单微爆桥和串联微爆桥结构的平面 PDS 放电开关，触发电压降低到 600 V，其制备工艺如图 9（f）所示。2024 年，北京理工大学曾庆轩团队[49]采用 MEMS 工艺技术，在玻璃基板上集成开关、爆炸箔、飞片以及加速膛，批量制造出爆炸箔起爆器芯片，封装体积降低为 2.194 cm^3，结构原理及实物如图 9（g）~（h）所示。

3.1.2 高压开关的微型化与高精度制造

文献综述显示，采用光刻、刻蚀等微加工技术实现了高压开关的微型化与高精度制造。该技术的优势主要体现在以下 3 个方面：首先，高集成度特性使得开关与爆炸箔芯片能够集成在同一硅基板上，显著减少了系统的体积；其次，通过精确调整电极间隙和材料厚度，实现了对开关导通时间和耐压能力的优化，提高了可控性；最后，该技术适用于大规模生产，从而有效降低了制造成本。然而，微机电系统（MEMS）工艺存在局限性，主要表现为材料耐高温性能不足以及多层结构封装的难度较高。

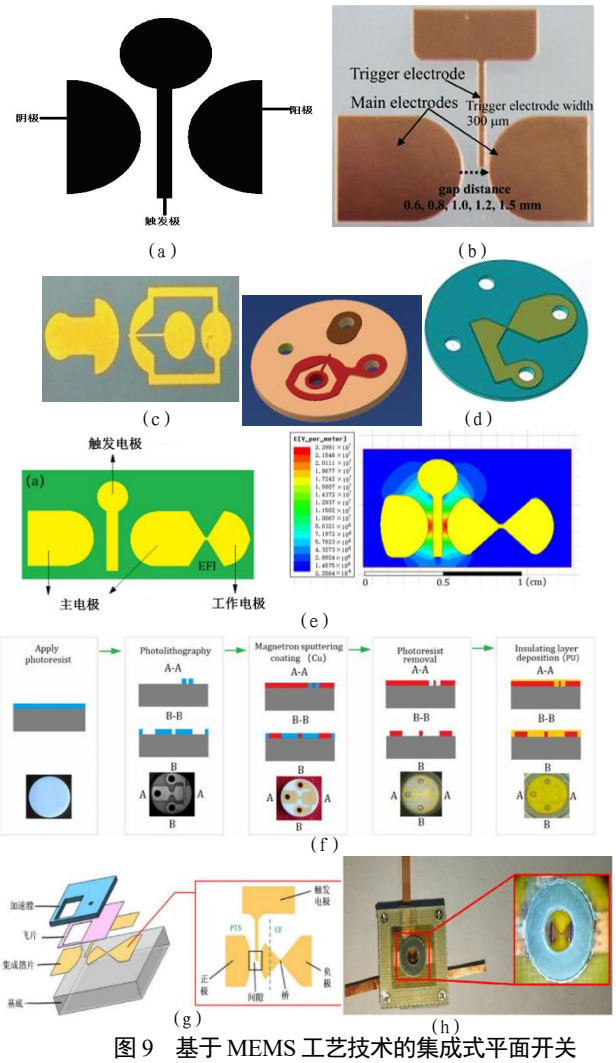


图 9 基于 MEMS 工艺技术的集成式平面开关

Fig. 9 Integrated planar switch based on MEMS process technology

基于 MEMS 工艺技术的集成式平面高压开关微型化技术主要包含以下 3 个方面的突破性进展：首先，通过采用叉指电极或尖端场增强的电极结构设计，降低触发电压至低于 1 kV，并且提升了导通均匀性；其次，利用化学气相沉积（CVD）技术制备的氮化硅或类金刚石（DLC）薄膜，对绝缘层进行了优化，使得耐压强度提升至 500 V·μm^{-1} 以上；最后，通过采用真空封装或惰性气体填充技术，有效减少了电极氧化现象，从而延长了开关的使用寿命。

3.2 低温共烧陶瓷（LTCC）集成工艺

3.2.1 LTCC 工艺技术概述

低温共烧陶瓷（LTCC）工艺技术采用厚膜材料，

依据预先设计的结构，将电极材料、基板、电子器件等一次性烧结，形成一种高集成度、高性能的电路封装技术。该技术在封装及微波器件等领域的应用极为广泛[17]。2018 年，Zhu P 等[50]首次采用 LTCC 工艺集成制备了 McEFI，并利用陶瓷飞片成功起爆 HNS 炸药。其制备工艺及样品示意图如图 10（a）所示。

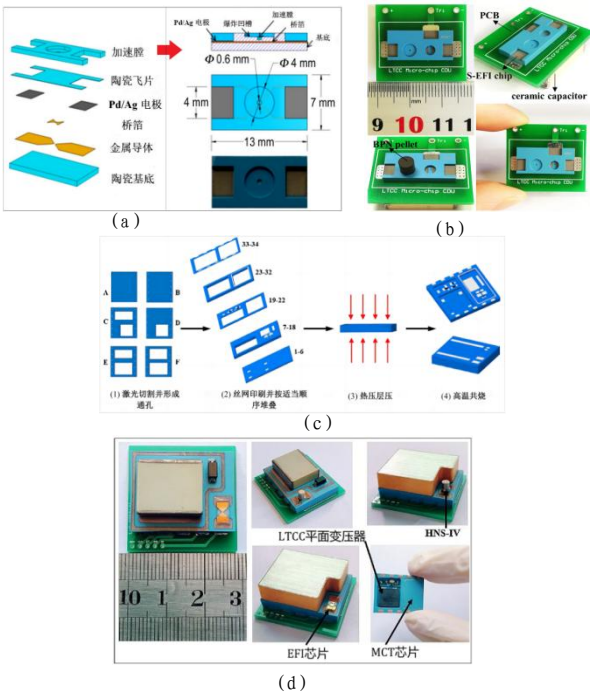


图 10　基于 LTCC 工艺技术的集成式 EFI

Fig. 10　Integrated EFI based on LTCC process technology

2020 年，Zhang Qiu 等[51]利用 LTCC 工艺进行 LTCC- PTS 和 LTCC- EFI 的集成设计，制备了开关集成爆炸箔芯片，如图 10（b）所示。该芯片开关的延迟时间为 29 ns，电流输入到 EFI 中的速率可达到 11.7 A・ns^{-1}。2020 年，Jiao LI 等[52]开展了基于低温共烧陶瓷技术的爆炸箔起爆系统的模块化设计及制造技术研究，成功实现了将升压电路、点火电路和 EFI 通过 LTCC 技术进行了模块化系统集成。首次提出将 MCT 高压开关通过 LTCC 与 EFI 进行集成，将爆炸箔起爆系统体积缩小到 5.67 cm^3。与传统爆炸箔起爆系统相比，放电回路电感降低到 27 nH，减少了 55%，飞片速度提升到 3 800 m・s^{-1}，提高了 15.2%。其制备工艺及实物如图 10（c）~（d）所示。

3.2.2 高压开关与 EFI 的集成实例

利用多层陶瓷共烧技术，LTCC 工艺实现了高压开关与 EFI 的集成。其技术特点如下：（1）陶瓷基板具备耐高温性能，适用于航天器等高热负荷的应用环境；（2）通过共烧工艺，开关与爆炸箔芯片得以实现一体化结构集成，形成独石结构，从而增强机械稳定性；（3）采用低介电损耗的陶瓷材料，适宜于高频高压脉冲的传输。尽管如此，LTCC 工艺的加工精度相较于 MEMS 技术有所不足，且在烧结过程中出现的尺寸收缩问题，需要通过优化材料配方来解决。

4　高压开关的对比

4.1　结构设计及介质材料

通过综合分析国内外相关文献，可以发现高压开关的性能参数与其结构设计和介质材料的选择密切相关。结构设计主要涉及开关电极的几何形状、间隙距离等关键参数，这些参数不仅决定了开关的性能指标，而且对开关的使用寿命产生重要影响。表 1 详细归纳了直列式爆炸箔起爆器所用高压开关的结构特征及其材料特性。

表 1　高压开关的结构特点及材料特性

Tab. 1　Structural characteristics and material properties of high-voltage switches

开关类型	结构特点	材料特性	工艺类型
气体/真空高压开关	立体式陶瓷真空封装结构，力学过载性能差，集成度差。	绝缘性好的陶瓷材料	陶瓷金属密封烧结工艺
半导体固态 MOSFET 高压开关	微电子半导体平面结构，电磁及气候环境性能较差。	金属氧化物半导体材料	微电子技术及金丝键合封装工艺
半导体固态 IGBT 高压开关	微电子半导体平面结构，电磁及气候环境性能较差，体积大、成本高。	金属氧化物半导体材料	微电子技术、半导体集成及金丝键合封装工艺
半导体固态 MCT 高压开关	微电子半导体平面结构，电磁及气候环境性能较差，集成度好。	金属氧化物半导体材料	微电子技术、半导体集成及金丝键合封装工艺
平面火花隙 PTS 高压开关	平面结构，力学过载性能较好，放电寿命次数少，集成度好。	金属薄膜材料	MEMS 工艺
平面电爆炸 PDS 高压开关	平面结构，力学过载性能较好，一次性寿命，集成度好。	金属薄膜材料	MEMS 工艺

4.2　关键性能参数

高压开关作为直列式爆炸箔起爆系统中的核心关键组件，其性能参数不仅决定了起爆回路的输出特性，还直接影响爆炸箔起爆器的可靠性。因此，该组件的性能参数对系统的安全可靠性具有决定性作用。

表2列出了直列式爆炸箔起爆器用高压开关的工作原理、性能参数以及工作特性。

4.3 集成工艺

在爆炸箔起爆系统技术进步的进程中，设计理念与制造工艺的创新占据核心地位。MEMS 集成工艺与 LTCC 技术显著推动了爆炸箔起爆系统集成技术的演进。

不同高压开关集成工艺的对比如表 3 所示。

表 2 高压开关的性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of high-voltage switches

开关类型	工作原理及特性	额定电压/kV	导通电流/kA	触发电压或能量	导通时间/μs	工作寿命/次
气体/真空高压开关	保持绝缘的阴阳主电极间充直流高压，当给触发极施加特定的脉冲电压信号后，阴极与触发极间形成高的击穿场强，产生一定数量的离子或电子，粒子与气体经历碰撞倍增过程，致使开关阴阳极瞬间导通。	⩾100(气体）；20~50（真空）	10~50	50~200 mJ	> 0.1	> 1 000
半导体固态 MOSFET 高压开关	通过栅极驱动电压使电子从源极经沟道和漂移区流向漏极实现开关导通，也可以采用 GaAs 或 SiC 基片利用光电导通效应，通过激光触发产生载流子的光导高压开关。	3~6	4	±20 V	< 0.1	> 20 000
半导体固态 IGBT 高压开关	给栅极-发射极之间施加正向电压（通常 U⩾15 V），MOS 沟道形成，为 PNP 晶体管提供基底电流，开关导通。	<6.5	4	⩾15V	10~100	> 20 000
半导体固态 MCT 高压开关	在栅极施加正电压（P-MCT），MOSFET 导通，触发晶闸管自锁导通；在栅极施加负电压，MOSFET 短路晶闸管的阴极，强制关断（类似 IGBT 的栅极控制）。	< 2.0	4	+5V	< 1	> 20 000
平面火花隙 PTS 高压开关	在触发极施加脉冲电压信号，阴极与触发极间形成高的击穿场强，产生一定数量的离子或电子，与气体经历碰撞倍增过程，致使开关阴阳极瞬间导通。	> 3.0	⩾3	> 1.5 kV	< 0.1	< 100
平面电爆炸 PDS 高压开关	使多晶硅或非结晶硅桥箔发生电爆炸产生导电等离子体云团，进而导通高压电极间的缘间隙，实现短脉冲大电流输出。	> 3.0	⩾3	<600 V	< 0.1	1

表 3 高压开关的集成化工艺对比

Tab. 3 Comparison of integration processes of high-voltage switches

开关类型	工艺特点	适用开关类型	工艺类型	局限性
MEMS 集成工艺	利用光刻、刻蚀、薄膜沉积、键合等微加工技术实现微型化与高精度制造，沉积温度低、速度快、薄膜均匀性好、成分接近靶材成分。	平面火花隙开关、平面电爆炸开关	薄膜均匀性好，电学性能优异，高集成度，快速响应，批量化生产。	工艺复杂，设备要求高，材料耐高温性不足，多层结构封装难度高。
低温共烧陶瓷（LTCC）工艺	采用厚膜材料，通过多层陶瓷共烧实现高集成度与高性能电路封装，具有优异的电子、机械及热力特性。	平面火花隙开关、平面电爆炸开关	耐高温，机械稳定性强，低介电损耗。	加工精度低于 MEMS，烧结过程中的尺寸收缩问题需优化。

5 总结及展望

本研究综述了直列式爆炸箔起爆系统中高压开关的性能、工作原理及其分类，并探讨了集成化工艺的最新进展。通过对比分析，着重探讨了高压开关的结构设计和关键性能参数。研究指出，高压开关的高性能化与集成化是提高直列式爆炸箔起爆系统可靠性的关键所在。MEMS 工艺与半导体技术的结合，显著提升了开关的响应速度和耐压性能。目前，基于 LTCC 工艺制备集成式平面高压开关及爆炸箔起爆系统正处于技术优化阶段，预计将引领未来的研究方向。

基于当前研究现状，本研究建议未来针对直列式爆炸箔起爆器用高压开关的研究应聚焦于以下方面：

（1）在系统小型集成化方面，应开发耐高温的硅基材料和封装技术，开展硅基微加工技术研究，实现开关、电容与爆炸箔的片上集成，以适应微型化武器系统的需求。此外，推动 MEMS 技术的高压开关在军事领域的规模化应用，是未来研究的重要方向。

（2）在工程化应用方面，需进一步优化 MEMS 与 LTCC 工艺，使之与爆炸箔材料的热膨胀系数和电学特性相匹配。在极端环境（如高冲击、宽温域）下，应关注开关的寿命和失效模式，并在小型化设计中平衡开关尺寸与能量释放效率。结合电-热-力耦合仿真，优化开关在极端工况下的可靠性。

（3）结合人工智能（AI）技术，优化材料、结

构及集成方案，推进 MEMS 与 LTCC 集成工艺的融合及跨学科协同创新。研究低收缩率陶瓷浆料与高精度印刷技术，以提升加工一致性。结合微控制器实现开关的智能触发与状态监测，从而增强系统的安全性。

参考文献：

[1] Hebderson J H，Baginski T A. Two novel monolithic silicon substrate slapper detonators[C]//Industry Applications Society Meeting. IEEE, 1993 (3):2 479-2 482.

[2] 贺思敏, 赵世明, 蒋小华, 等. 应用于冲击片雷管的小型脉冲功率源研究[J].火工品, 2011(4): 5-7.

[3] 褚恩义,任西,钱勇, 等. 爆炸箔冲击片起爆设计参数研究[J]. 火工品, 2008(3): 26-27.

[4] K.W.Chu,G.L.Scott.A comparison of high-voltage switches [C]//Sandia National Laboratories,1999.

[5] N.Tom,et al. Highly integrated firing module[C]// Proceedings of the 43rd Annual Fuze Conference and Munitions Technology Symposium VI, 1999.

[6] Jim R.Denney. Fireset for a low energy exploding foil initiator: MOSFET drive MOSFET switch:US, 6138571[P].2000-10-31.

[7] Jim R.Denney. Fireset for a low energy exploding foil initiator: SCR drive MOSFET switch:US, 6634298B1 [P].2003-10-21.

[8] 覃新,朱朋,徐聪,等.基于 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性[J]. 含能材料,2019,27(5):417-425.

[9] 杨智,朱朋,徐聪,等. 微芯片爆炸箔起爆器及其平面高压开关研究进展[J].含能材料,2019,27(2):167-176.

[10] 周密, 孟庆英, 韩克华, 等. 爆炸平面开关的设计及研究[J]. 火工品, 2012(6): 12-14.

[11] GJB/Z 35-1993 元器件降额准则[S]. 国防科学工业技术委员会, 1993.

[12] 曾庆轩, 李守殿, 袁士伟, 等. 爆炸箔起爆器用高压开关研究进展[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1): 202-205.

[13] XU Cong，ZHU Peng，ZHANG Wei，et al. A plasma switch induced by electro explosion of p-n junction for mini exploding foil initiator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5)：2 710-2 716.

[14] 李东杰,李华梅,谭亮,等.引信电子安全与解除保险装置发展现状及趋势[J].探测与控制学报,2015,37(2):2-6.

[15] Z. Chen, X. Duan, M. Liao, H. Zhang, M. Zhang, J. Zou, Closing performances of double-gap laser-triggered vacuum switch[J]. High Voltage, 2021,6(2):328-336.

[16] Ming Zhang, MinfuLiao , Gang Lu, et al. A high-voltage and high-current miniaturized surface flashover triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2025,53(2): 284-291.

[17] Perry Salyers. Guided MLRS electronic safety & arming devices（ESAD）& electronic safety & arming fuze（ESAF）[C]//43rd Gun & Missile Conference. New Orleans,2008.

[18] Hanks R L. Low-jitter high-power thyristor array pulse driver and generator:US, 6462605[P].2002-10-08.

[19] A. Kamada, K. Matsubayashi, A. Nakagawa, Y. Terada, T. Egawa. High-voltage AlGaN/GaN schottky barrier diodes on Si substrate with low-temperature GaN Cap layer for edge termination[C]//IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices,2008.

[20] T. Jing , C. Zhang. The model of IGBT as a power switch[C]// Proceedings of the International Conference on Electronics, Communications and Control, 2015.

[21] Max Perrin. Fuzing systems for advanced weapon performance[C]//59th NDIA Fuze Conference. South Carolina, 2016.

[22] Michael Deeds. Navy s&t strategy[C]//NDIA's 60th Annual Fuze Conference. Cincinnati, 2017.

[23] 彭朝飞,陈万军,孙瑞泽,等. MCT 与 Clustered IGBT 在大功率应用中的比较研究[J].电子与封装,2014(6):32-36.

[24] Grilliot D， Hatch C. Multiple launch rocket system(MLRS) fuzing evolving to meet end user requirements[C]//51st Annual NDIA Fuze Conference. Nashville,2007.

[25] 贺思敏,何小东,文剑蓉，等.新型 CDU 单元与冲击片雷管能量匹配以及起爆同步性能研究[C]//中国兵工学会火工烟火专业委员会第十九届学术年会,2017.

[26] Li. J. Gate driver design for planar high-voltage switches in exploding foil systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019,34(8):6 234-6 242.

[27] Yuyang Guo, Chuang Chen, Ruizhi Wang, et al. Macro meso

response and stress wave propagation characteristics of MCT high-voltage switch under shock load [J]. Defence Technology, 2024(32):317-335.

[28] Earley L M,Scott G L. Low-cost,3 kV,triggered, stripline, surface-discharge switch[C]//Digest of Technical Papers of the Eighth IEEE International Pulsed Power Conference,1991.

[29] Baginski T A. A robust planar triggered spark gap switch for high power pulse applications[C]//60th Annual Fuze Conference, 2009.

[30] Song F, Li F, Zhang B, et al. A compact and repetitively triggered, field-distortion lowjitter spark-gap switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 4 105-4 113.

[31] Baginski T A，Dean R N，Wild E J. Micromachined planar triggered spark gap switch[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology,2011, 1(9):1 480-1 485.

[32] 王桂吉,吴刚,赵剑衡,等.平面火花隙三电极开关研制及性能测试[J].强激光与粒子束,2006,18(2):349-352.

[33] 周镇威,杨卓青,丁桂甫,等.微型平面式气体火花开关的设计和制作[J].强激光与粒子束,2012,24(5):1 256-1 260.

[34] Zeng Q X，Lv J J，Li M Y. Fabrication and testing of metal foil planar switch [J]. Defence Technology, 2013, 9(2):80-84.

[35] 李志浩. 爆炸箔起爆系统高压平面固体开关技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

[36] 陈楷,徐聪,朱朋,等. 加速膛与复合飞片对集成爆炸箔起爆器性能的影响[J]. 含能材料,2018,26(3):273-278.

[37] 杨智,朱朋,初青芸,等. PCB 基密封并联平面触发火花间隙开关的设计与性能[J].含能材料,2021,29(6):543-551.

[38] 曹兴,韩克华,杨康,等. PCB 平面三电极空气火花隙开关导通特性试验研究[J]. 火工品, 2023(1):1-5.

[39] Kehua Han ,Wanjun Zha, Peng Deng, et al. Research on characteristics of copper foil three-electrode planar spark gap high voltage switch integrated with EFI[J]. Applied Sciences, 2022(12):2-19.

[40] R. A. Graham. Shock-induced electrical swithing in polymeric films, megagauss physics and technology[M]. New York: Plenum Publishing Corporation, 1980.

[41] Richardson D D. Effect of switch resistance on the ringdown of a slapper detonator fireset[R]. Ascot Vale, Australia: Materials Research Laboratory,1986.

[42] Nerheim E. Integrated silicon plasma switch:US, 4840122A [P]. 1989-06-20.

[43] Baginski T A, Thomas K A. A robust one-shot switch for high-power pulse applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(1):253-259.

[44] 胡博,李杰,朱朋,等.基于 Parylene C 的单触发开关性能实验研究[J].强激光与粒子束,2015,27(6):233-237.

[45] Bo H, Peng Z, Shen R, et al. Design and characterization of micro plane explosion switch with Al/CuO reactive multilayer films [J]. High Power Laser and Particle Beams,2015,27(2):2 563-2 571.

[46] T. A. Baginski. A robust planar triggered spark gap switches for high power pulse applications[C]//Proceedings of NDIA's 60th Annual Fuze Conference, 2009.

[47] Kehua Han,Wanjun Zhao, XinZeng, et al. Enhanced performance of series microexploding bridge planar discharge switch integrated with exploding foil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023,38(3):3 375-3 383.

[48] K. Jeet. et al. Design, fabrication and characterization of MEMS based planar spark gap switch integrated with exploding foil initiator[C]//2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). IEEE, 2017.

[49] Zehao Wang, PengfeiXue ,Qingxuan Zeng, et al. Design, fabrication and performance test of an integrated exploding foil initiator system[J]. Defence Technology, 2024,42:125-135.

[50] Zhu P，Chen K，Xu C，et al. Development of a monolithic microchip exploding foil initiator based on low temperature co-fired ceramic[J/OL]. Sensors & Actuators A: Physical. (2018-04-03) [2024-07-20].http://dx.doi.org/10.1016/j.sna. 201804032.

[51] Zhang Qiu, Xu Cong, Zhu Peng, et al. Planar trigger switch and its integrated chip with exploding foil initiator based on low-temperature cofiredceramic[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(3):2 908-2 916.

[52] Jiao LI, Qingjie JIAO, Enyi CHU, et al. Design, fabrication, and characterization of the modular integrated exploding foil initiator system based on low temperature co-fired ceramic technology [J/OL].Sensors and Actuators A: Physical.(2020-10-06) [2024-07-20].https://doi.org/10.1016/j.sna.2020. 112 365.