

文章编号:1006-9941(2019)02-0167-10

微芯片爆炸箔起爆器及其平面高压开关研究进展

杨智,朱朋,徐聪,张秋,覃新,沈瑞琪

(南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094)

摘要: 爆炸箔起爆系统(Exploding Foil Initiator system, EFIs)的每一次技术升级都伴随着设计理念和制造工艺的革新,尤其是微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)和低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC)工艺,极大地促进了微芯片爆炸箔起爆系统(Micro Chip Exploding Foil Initiator system, McEFIs)的发展。简要分析了两种工艺制备微芯片爆炸箔起爆器(Micro Chip Exploding Foil Initiator, McEFI)的优缺点,列举了几种平面高压开关在电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)中的工作性能,得出了开关的设计思路和研究方法的可行性。基于MEMS工艺和LTCC工艺制备及研究McEFI、平面高压开关和平面高压开关集成McEFI,分别总结了国内外的研究进展。提出了重点研究方向:深入研究MEMS工艺制备McEFI及其平面高压开关,以达到工程化应用;采用LTCC工艺,一体化烧结可制备具有独石结构的平面高压开关和McEFI。

关键词: 微芯片爆炸箔起爆系统(McEFIs);电容放电单元;微芯片爆炸箔起爆器(McEFI);平面高压开关;研究进展

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018146

1 引言

爆炸箔起爆系统(Exploding Foil Initiator system, EFIs)是一种直列式点火与起爆装置,具有高安全性、高可靠性和可检测性等特点,适用于武器弹药的钝感点火与起爆。近年,由于微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)工艺和低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC)工艺逐渐融入,EFIs关键元器件的设计理念和制造工艺得到不断革新,推动EFIs逐渐向微芯片爆炸箔起爆系统(Micro Chip Exploding Foil Initiator system, McEFIs)方向发展。McEFIs主要包括脉冲功率源(Pulse Power Unit)和微芯片爆炸箔起爆器(Micro Chip Exploding Foil Initiator, McEFI)两部分。脉冲功率源主要包括升压器、高压电容和高压开关;McEFI主要包括基

板、爆炸桥箔、飞片层、加速膛和六硝基芪(HNS)炸药(当用于点火时,一般采用BPN(B/KNO₃)点火药)。McEFIs的工作过程如下:升压器将约28V的弹上电压升至几千伏给高压电容充电;高压开关触发后,高压电容释放短脉冲大电流使桥箔电爆炸并产生高温高压金属蒸汽和等离子体;在加速膛的约束下剪切并驱动聚合物飞片冲击起爆HNS炸药。由高压电容、高压开关、McEFI及扁平传输电缆组成的电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)常被等效为RLC回路,回路的等效电感和等效电阻对桥箔爆发时间均有显著性影响,进而影响桥箔的爆发功率和能量利用率,然而桥箔需要大于5MW的功率才能发生有效电爆炸,因此CDU对McEFIs的发火起着决定性作用,应采取措施缩短扁平传输电缆,提高系统集成度,降低发火能量^[1-2]。

近年,适用于McEFIs的小体积高压陶瓷电容已逐渐实现型谱化^[3-5],与此同时,国内外研究者基于MEMS和LTCC工艺,针对EFIs的其它关键元器件也开展了深入研究。基于上述分析,总结了国内外有关McEFI、平面高压开关和平面高压开关集成McEFI的研究进展,以期为同行研制McEFI及其平面高压开关提供参考。

收稿日期:2018-06-04;修回日期:2018-08-10

网络出版日期:2018-11-29

基金项目:江苏省自然科学基金资助(BK20151486)

作者简介:杨智(1994-),男,博士研究生,主要从事MEMS火工品技术研究。e-mail:yangzhi@njust.edu.cn

通信联系人:朱朋(1978-),男,博导,副研究员,主要从事先进火工品技术研究。e-mail:zhupeng@njust.edu.cn

引用本文: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.

YANG Zhi, ZHU Peng, XU Cong, et al. Review on Micro Chip Exploding Foil Initiator and Its Planar High-voltage Switch[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(2):167-176.

2 微芯片爆炸箔起爆器

2.1 基于MEMS工艺的McEFI

在火工品领域, MEMS技术一般是指利用微机电系统的先进制造和集成思想, 采用微机电系统制造技术, 如沉积镀膜和光刻的细微加工技术、微烟火技术和微型装药技术等, 将机械系统、微电子系统和化学能源系统集成成为具有功能化火工模块的技术。采用硅MEMS工艺与非硅MEMS工艺集成批量化制备McEFI的国内外研究进展总结如下。

最先出现以硅片作为基板, 通过镀膜、光刻、键合及刻蚀等MEMS工艺制备McEFI。1989年, Nerheim E和Hoff D^[6]在其专利中提出采用集成电路(Integrated Circuit, IC)技术制备McEFI: 1) 在P型单晶硅作的基板上外延生长25 μm厚的N型硅膜作为飞片层, 在外延硅膜上氧化出0.3~0.7 μm厚二氧化硅作为绝缘层; 2) 在绝缘层上采用光刻掩膜技术, 沉积图形化有规则的两个约2 μm厚的金属焊盘; 3) 制备两个金属焊盘间的过渡区和桥区, 材料可采用发火能量较低的重掺杂多晶硅(也可采用与焊盘一样的金属材料, 从而一体化制备金属爆炸桥箔, 简化制备步骤); 4) 采用深反应离子刻蚀工艺, 在桥箔桥区下方反向刻蚀硅基板至外延硅膜飞片层制备加速膛; 5) 将硅片划片形成单元, 使用环氧树脂将单元与Pyrex玻璃背板(厚度为0.635~2.54 mm)键合即得McEFI。具体结构如图1所示。

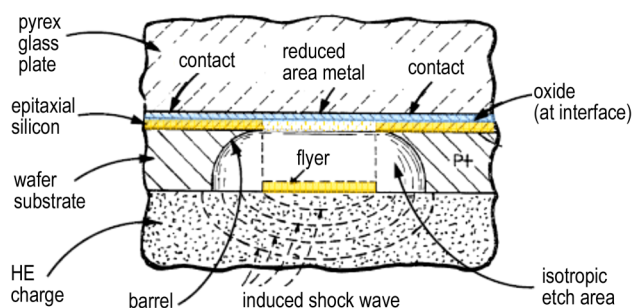


图1 硅MEMS工艺微芯片爆炸箔起爆器结构示意图^[6]

Fig. 1 Schematic diagram of McEFI structure with silicon MEMS technology^[6]

1993年, Hebderson J H和Baginski T A^[7]提出采用键合两块硅基板的方法制备McEFI: 在其中一块硅基板上依次沉积金属爆炸桥箔和聚酰亚胺(Polyimide, PI)飞片层, 在另一块硅基板上刻蚀出加速膛及焊盘通孔, 通过将两硅基板键合即制得McEFI。

国内, 施志贵^[8]、郭菲^[9]等也利用硅MEMS工艺制作了McEFI(图2), 该制备方法在刻蚀单晶硅基板制备加速膛时预留了单晶硅作为飞片层, 因此飞片层的材料与基板材料相同。而专利^[6]中所说的飞片层材料为N型单晶硅, 与作基板的P型单晶硅不同。施志贵等在文章中对制备工艺的描述较为详细, 并且预测在一定起爆条件下可以起爆六硝基芪-四型(HNS-IV)。郭菲等针对具体结构, 研究了飞片厚度(40~55 μm)对起爆HNS-IV药柱的影响规律。

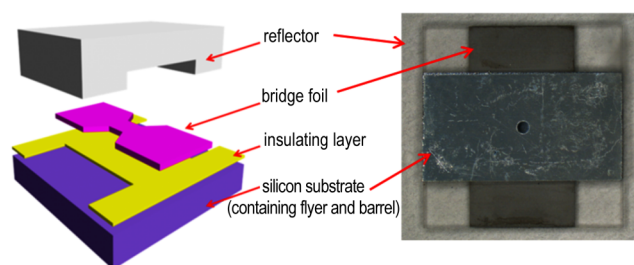


图2 硅MEMS工艺微芯片爆炸箔起爆器实物图^[9]

Fig. 2 Physical map of McEFI with silicon MEMS technology^[9]

2010年, 施志贵等^[10]针对硅MEMS工艺制备McEFI做了改进, 主要有以下三点: (1) 在玻璃基板而不是硅基板上制备金属爆炸桥箔; (2) 采用金属桥箔代替多晶硅桥箔; (3) 采用硅-二氧化硅-硅结构(SOI)材料代替单晶硅。改进缩短了McEFI的发火作用时间, 由原来的数十微秒缩短至2 μs, 在刻蚀加速膛过程中, 绝缘埋层能保证预留的飞片层厚度, 飞片层误差可控制在±3 μm内, 同时起爆试验结果表明该McEFI在3.14 kA电流下能够成功起爆HNS-IV。

这些研究表明采用硅MEMS工艺集成批量化制备McEFI是可行的, 然而该工艺采用到的阳极键合工艺对组件(硅基板和玻璃基板)的表面平整性和对位精度都有非常高的要求。基于此, 一方面需要解决如何对准的问题以沿用硅MEMS工艺制备McEFI, 另一方面需要开发新的制备工艺。

2009年, Desai A^[11]在专利中首次提出采用非硅MEMS技术自底向顶原位制备McEFI的工艺。该工艺最大的改进是加速膛不再需要反向刻蚀硅基板而得, 也不需要精密的键合工艺, 取而代之的是采用沉积镀膜、光刻及显影等技术将爆炸桥箔、飞片层、加速膛在基板上依次沉积, 逐步实现桥箔、飞片层及加速膛的图形化。此种工艺简单、加工精度高, 极大地提高了制备效率。2016年, 房旷等^[12]在Al₂O₃陶瓷基板上制备了一种基于聚氯代对二甲苯(Parylene C, PC)飞片与SU-8光刻胶加速膛的McEFI, 制备工艺如图3所示。

采用光子多普勒测速仪 (Photonic Doppler Velometer, PDV) 对比研究常规 McEFI (使用 PI 作飞片、使用不锈钢作加速膛) 和基于 MEMS 工艺的 McEFI (采用 PC 作飞片、采用 SU-8 作加速膛) 的飞片速度, 试验结果表明材料不同的加速膛和飞片未对速度影响显著, 由此采用非硅 MEMS 工艺制备 McEFI 是可行的。

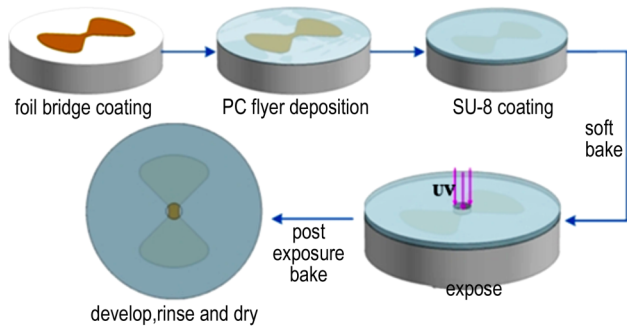


图3 基于SU-8加速膛的McEFI制备工艺^[12]

Fig.3 Preparation process of McEFI based on SU-8 acceleration barrel^[12]

2012年,曾庆轩等^[13]首先在玻璃基板上制得爆炸桥箔,采用粘贴PI的方法制作飞片层,然后在紫外光固化的环氧树脂上采用曝光、显影等工艺制作加速膛,爆发试验所得的飞片平均速度与理论计算值的一致性较好,相对偏差不超过8%。2017年,李可为等^[14]在4in(101.6mm)Pyrex7740玻璃基板上,采用铜作桥箔、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光刻胶作飞片层、SU-8胶作加速膛,集成制备单个体积为0.018cm³,共计268个的McEFI阵列。对McEFI进行了桥箔电爆、发火感度及高温性能的试验研究,结果表明:McEFI在2.4kV充电电压下,桥箔发生电爆的峰值电流时间与爆发电压时间基本重合,此时能量利用率最高,因此确定最佳发火电压为2.4kV;全发火电压为2.452kV,与最佳发火电压基本一致;160℃下至少可以耐温50h而不影响发火性能。另外,兰利法测试发火感度的结果表明发火电压偏高且标准差偏大,故需优化设计参数,尤其是要优化桥箔尺寸和飞片厚度。

2018年,陈楷^[15-16]等首先在Al₂O₃陶瓷基板上通过采用磁控溅射沉积Cu爆炸桥箔(为耐烧蚀和保证桥箔和基板的附着性,在沉积Cu桥箔之前沉积了200nmW-Ti合金膜)、气相沉积PC/Cu复合飞片层,然后一方面采用原位光刻制备SU-8加速膛,另一方面,由于采用SU-8光刻胶制备而得的加速膛表面平整度不高,采用粘贴SU-8干膜制备加速膛,制备所得McEFI的各组件如图4所示。

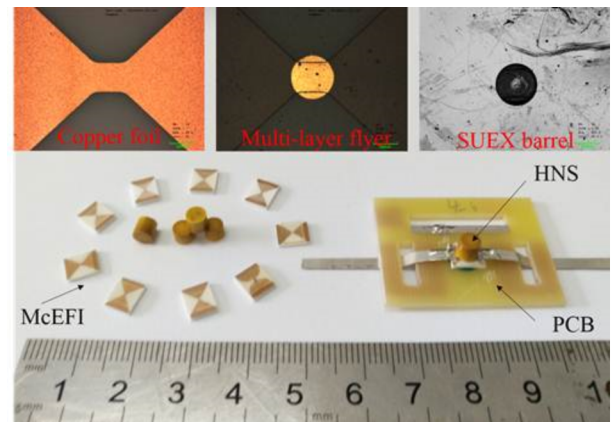


图4 MEMS工艺微芯片爆炸箔起爆器各组件照片^[15]

Fig.4 Component photos of McEFI with MEMS technology^[15]

作者开展了桥箔电爆特性、复合飞片速度影响规律及起爆HNS的试验研究。取加速膛尺寸为1.00mm(Φ) \times 0.40mm(H),采用PDV研究发火电压(1.25~2.5kV)对PC/Cu复合飞片速度的影响规律,结果表明:在该加速膛尺寸下,飞片的速度和加速度均随着发火电压的增大而增大,在1.25kV的发火电压下,复合飞片通过227ns加速到最大速度2240m \cdot s⁻¹,而在2.5kV发火条件下,飞片加速到最大速度3430m \cdot s⁻¹只需175ns;将复合飞片的速度-时间曲线进行积分可得到位移-时间曲线,在不同发火电压条件下,加速复合飞片到最大速度的位移均小于加速膛的高度 $H=0.395$ mm(实测高度),即飞片出加速膛口时,均已达到最大速度,可使复合飞片能以其最大速度冲击起爆HNS。此外,该McEFI可成功起爆HNS,这表明采用PC/Cu复合飞片与SU-8光刻胶、SU-8干膜等新型材料制备McEFI是可行的。

综上,国内外学者从硅MEMS工艺与非硅MEMS工艺两个方面,提供了两种切实可行的研制McEFI的工艺。

2.2 基于LTCC工艺的McEFI

基于MEMS工艺制备McEFI,所得McEFI的集成化程度高、体积小,可以实现批量化生产,提高了产品的一致性,降低了制备成本,但是制备过程包含镀膜及光刻等多个步骤,较为繁琐。LTCC技术是近年来兴起的一种多学科交叉整合组件技术,以其优异的电子、机械及热力特性,成为未来电子元件集成化及模块化的首选方式,广泛应用于封装及微波器件等领域^[17]。采用包括冲孔、丝网印刷、叠压、共烧及划片在内的LTCC工艺可以一体化烧结制备具有独石结构的McEFI,简化了制备过程,同时所得McEFI的机械化强

度较采用 MEMS 工艺制备的 McEFI 高, 但是目前基于 LTCC 技术制备 McEFI 的成本较高, 并且在相同测试条件下, 所得 McEFI 用于点火或者起爆时的飞片速度较低, 从而所需发火电压较高。总之, 尽管目前采用 LTCC 工艺制备 McEFI 有一些缺点, 却不失为一种可采用的制备工艺, 后期通过不断改进设计参数, 最终制备出性能优良的 McEFI。

2018 年, 朱朋^[18]、陈楷^[16]等首次采用 LTCC 工艺集成制备 McEFI, 样品示意图如图 5 所示。

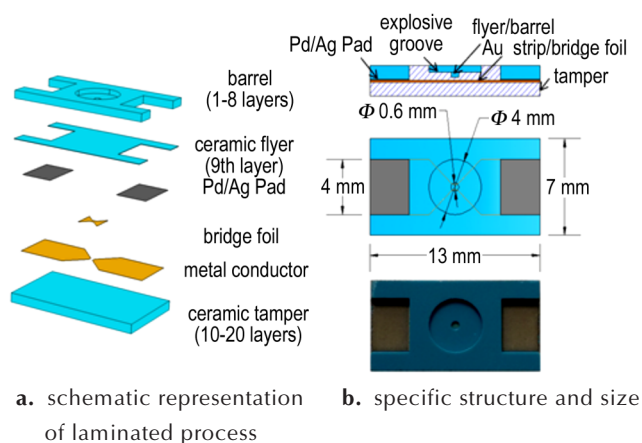


图 5 基于 LTCC 工艺制备微芯片爆炸箔起爆器^[16]

Fig.5 Fabrication of McEFI based on LTCC technology^[16]

朱朋^[18]、陈楷^[16]等开展了桥箔电爆特性、陶瓷飞片速度特征及起爆 HNS 的试验研究。获得了 Au、Ag 桥箔在不同发火电压下的电爆性能。其中, 取加速膛尺寸为 $0.56 \text{ mm}(\Phi) \times 0.30 \text{ mm}(H)$, 桥箔材料选用 Au, 尺寸为 $L \times W \times H = 0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$, 采用 PDV 研究发火电压 (1.8~2.8 kV) 对陶瓷飞片速度的影响规律, 结果表明: 在上述条件下, 当发火电压小于 2.5 kV 时, 飞片的速度和加速度均随着发火电压的增大而增大, 在发火电压为 2.5 kV 左右时, 陶瓷飞片的速度与加速度均达到最大, 其中最大速度为 $2422 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 将陶瓷飞片的速度-时间曲线进行积分可得到位移-时间曲线, 在不同发火电压条件下, 陶瓷飞片加速到其最大速度所需的位移均大于加速膛的高度 $H = 0.3 \text{ mm}$, 即陶瓷飞片出加速膛口时, 均未达到其最大速度, 故需要适当地增加加速膛的高度。

另外, 采用 McEFI 起爆装药密度为 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、尺寸为 $4 \text{ mm}(\Phi) \times 4 \text{ mm}(H)$ 的 HNS 炸药。从起爆试验结果可知: Au McEFI 的最小起爆电压 (起爆 HNS 时最小的主回路充电电压, 也称最小发火电压) 为 2.5 kV, 这与 Au 桥箔电爆确定的最佳发火电压以及飞

片速度均保持一致; 而 Ag McEFI 的最小起爆电压为 2.8 kV, 与其最佳发火电压以及飞片速度均有差别, 分析认为是 Ag 桥箔电爆程度过于剧烈, 陶瓷飞片难以保持完整, 导致最小起爆电压偏高。起爆试验测量铝鉴定块炸坑尺寸约为 $5 \text{ mm}(\Phi) \times 0.76 \text{ mm}(H)$, 以此判断 HNS 炸药柱均为完全爆轰。

3 平面高压开关

3.1 平面高压开关性能分析

脉冲功率源中的高压开关是 EFIs 的一个关键器件, 它决定着起爆回路的输出特性, 直接影响 EFIs 的整体性能。目前国内外主要使用立体式火花隙三电极结构的气体开关和真空开关, 以及 IGBT (绝缘栅双极型晶体管, Insulated Gate Bipolar Transistor) 和 N-MCT (N-MOSFET 控制导通的金属氧化物半导体控制晶闸管 (MOS Controlled Thyristor)) 半导体开关^[19-20]。气体开关和真空开关同属火花隙三电极结构开关, 有其固有优点, 如工作电压高、工作温度高及漏电电流小 (在工作电压下小于 1 nA) 等, 但缺点是价格高、开关为立体式结构, 与 McEFI 集成度低; IGBT 和 MCT 半导体开关虽然成本较低, 但缺点是工作电压上限低 (MCT 开关的工作电压小于 1400 V)、工作温度上限低 (MCT 开关的工作温度小于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)、漏电电流大且响应速度慢。近年来, 随着微加工技术的发展, 国内外学者研制出了平面高压开关以提高 EFIs 的集成度及降低开关生产成本。这些开关主要包括两大类: 单次触发高压开关 (平面电爆炸高压开关与二极管单次触发高压开关) 以及平面火花隙三电极高压开关, 表 1 列出了几种平面高压开关在 CDU 中的工作性能。需要说明: (1) 文献 [16] 将从峰值电流的 10% 至 90% 所需时间定义为上升时间, 其它文献则以开关主回路电流从零至峰值所需时间作为上升时间; (2) 平面火花隙三电极高压开关的性能受主电极间隙、主电极结构以及测试气体氛围的影响, 因此测试结果依赖于特定的试验条件。

与目前常用的高压开关 (电气性能参数可参阅文献 [19] 和文献 [20]) 相比, 平面高压开关能满足 EFIs 的使用要求, 且成本低、易与 McEFI 集成, 提高了 McEFIs 的集成度。下面分别对这两大类型的平面高压开关总结分析。

3.2 单次触发高压开关

(1) 平面电爆炸高压开关平面电爆炸高压开关,

表 1 几种平面高压开关在 CDU 中的工作性能参数

Table 1 Working performance parameters of several planar high voltage switches in CDU

type of planar high-voltage switch	pulse life /shots	operating voltage /V	peak current capability/A	rise time /ns	trigger requirements/V
planar-electric explosion switch ^[21]	1	1200	635-940	-	1000-2500
planar high-voltage switch with SBD trigger	1	800 ^[22-23] 1500 ^[24]	1236 ^[23] 1730 ^[24]	100 ^[23] 178 ^[24]	50 ^[23] 90 ^[24]
planar triggered spark gap switch	about 1000 ^[25]	1250-2250 ^[16]	1870-3470 ^[16]	120-153 ^[16]	3000 ^[16]

是指利用金属桥箔电爆炸产生具有导电特性的等离子体,进而使桥箔两侧的主电极导通的一种单次触发高压开关。1989年,Nerheim E等^[26]发明了一种硅基平面电爆炸高压开关,具体制作工艺是首先在硅基板沉积两金属焊盘作触发电极,在两触发电极间沉积非晶硅或者多晶硅作为桥箔,然后制作与触发回路桥箔垂直且具有绝缘间隙的高压电极。开关作用前先对高压电极的两端充高压,触发回路采用恒流源激励,使非晶硅或多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绝缘间隙,实现短脉冲大电流输出,完成高压开关的功能。

2012年,张欢^[27]设计并制备了六种不同类型的平面电爆炸高压开关,从制备工艺、触发电极等离子体特性、放电性质等方面对开关进行了研究,但该开关还不足以很好地应用在EFIs回路中,尚待改进。2012年,周密等^[21]采用离子刻蚀的方法制备开关,将开关与McEFI串联组成电爆测试电路,在1.0~2.5 kV触发电压下,研究电极间隙对回路放电特性的影响。结果表明:在同一触发电压下,开关作用时间随着间隙距离的增大而延长;McEFI的爆发电流随着间隙距离的增大而减小。Baginski T A等为提高电爆炸开关的峰值电流和可靠性,设计了具有串联小爆炸桥箔结构的开关,同时提出将开关与McEFI集成的构想。虽然理论上此种设计结构能提高开关的电气性能,但目前未见进一步的报道。

2015年和2016年,胡博^[28-29]在单质铜薄膜平面电爆炸高压开关的基础上,在触发电极桥区增加Al/CuO复合含能薄膜以提高开关性能,开关结构设计如图6所示。

作者利用仿真软件优化了开关电极结构,分析比较了不同结构的开关在有无约束状态(用PI胶带粘贴在部分样品表面)下的性能,研究结果表明:无约束状态下当开关主回路充电电压为1.5 kV时,开关主回路的峰值电流约为1.14 kA,比约束状态下的峰值电流高约53%,同时缩短了电流上升时间;在约束状态下

和一定电压范围内,开关中的Al/CuO复合薄膜的铝热反应能够提高峰值电流,并且薄膜厚度越大、调制周期越小,电流提高越显著,在无约束状态下复合薄膜对峰值电流的影响不显著。

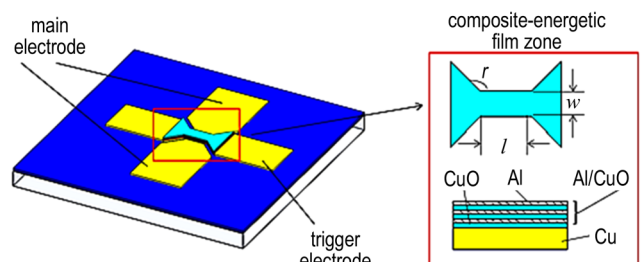


图 6 沉积 Al/CuO 的平面电爆炸高压开关^[29]
Fig.6 Planar-electric explosion switch deposited with Al/CuO^[29]

(2)二极管单次触发高压开关该开关为“三明治”结构,主要由基板、上下金属电极层、绝缘电介质层及肖特基势垒二极管(Schottky-barrier diode, SBD)组成。开关的作用机理是通过向SBD施加反向电压使其被反向击穿,产生短脉冲大电流使肖特基节点剧烈电爆,电爆产生的等离子体强射流击穿绝缘介质,从而使上下电极发生电弧导通,至此开关主回路闭合。2009年, Baginski T A等^[23]设计了SBD单次触发开关,开关示意图如图7所示。该开关的优点是其结构

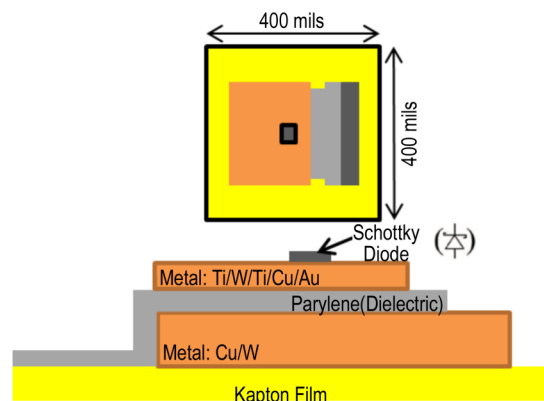


图 7 平面肖特基单次触发高压开关示意图^[23]
Fig.7 Schematic diagram of Planar High-voltage Switch with SBD trigger^[23]

简单、阻抗低、触发电压小且闭合速度快;缺点即其特点是只能一次导通高压,不能重复性使用,而且绝缘介质的耐压性能难以精确控制。

2012-2016年,胡博^[30-34]通过在陶瓷基覆铜板上直接制备出肖特基单次触发高压开关,简化了制备工艺,并申请了专利。作者观察了肖特基二极管的电爆炸现象,测量了等离子体电荷通量、电子温度和密度等特征参数,分析了开关的触发极性效应。研究了不同介电层材料(PC和PI)、封装材料(AB胶、HTPB橡胶和704胶)、SBD等对开关导通性能的影响规律,获得了提高开关导通性能可供参考的工艺参数。研究了在不同开关主回路电压下开关的电气性能规律,结果表明开关的主回路峰值电流和开关主回路充电电压呈正相关,但上升时间、主回路等效电感与主电压无显著性关系。

3.3 平面火花隙三电极高压开关

平面火花隙三电极高压开关,其作用原理类似传统立体火花隙三电极高压开关(特指气体开关):先给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,产生一定数量的自由电子,自由电子与气体经历碰撞倍增过程,致使开关阴阳极瞬间导通。一方面,相较于立体火花隙高压开关,平面火花隙三电极高压开关更易于与McEFI集成,提高了McEFIs的集成度,通过采用MEMS工艺或者LTCC工艺制备,能够实现批量化制备,因而成本较低;另一方面,相较于单次触发高压开关固有的作用一次性特点,在耐烧蚀材料层的保护下,该开关能多次重复使用且不影响作用性能。

1991年,Earley L M和Scott G L^[25]采用铜-聚酰亚胺印刷电路研制了两种平面火花隙三电极高压开关,开展开关性能测试研究,获得了不同间隙电压下开关延迟时间(从给触发电压信号开始到开关主回路明显出现电流的时间)和抖动以及使用寿命等信息,并且使用光电倍增管和高速分幅相机研究了开关的触发机制。开关可以满足常规弹药发火装置的使用要求,且价格低。1993年,Waschl J A和Hatt D J^[35]在扁平铜带电缆上刻蚀出开关,并与两种真空开关进行了包括电感、电阻及发火电压在内的对比试验研究,结果表明:开关类型对发火电压、飞片速度及能量利用率等的影响不显著,同时该开关的电感较低,可应用于McEFIs中。2008年Woodworth J等^[36]研制了两种用于线性变压器驱动的低电感开关,该开关可以充电至

200 kV、电感69~85 nH、在400 J能量作用下使用次数超过5000次。2011年,Baginski T A等^[37-38]设计制备了一种含PI绝缘层的开关,该开关可直接集成到传统带状线CDU中,降低了发火回路的寄生电感。

2006年,王桂吉等^[39]制作出一种适用于平行板传输连接的平面火花隙三电极高压开关,两主电极为半圆形的不锈钢,触发电极为窄细条的钨铜合金。该开关应用于充电电压小于10 kV的脉冲功率装置(包括McEFIs)时,与立体火花隙三电极开关相比,优化了回路的参数:放电回路电感降低约50 nH,周期缩短近1/3,峰值电流增加约1/3。2012年,丁桂甫^[40]、周镇威^[41]等采用表面微加工技术设计并制作了开关。得出开关的峰值电流为3.45 kA,上升时间为164 ns;通过电路仿真并提取参数,得出开关的电感为26.5 nH,电阻为66 mΩ,认为该开关具有较好的实用化前景。2011年和2013年,Zhao X^[42]、Shen H^[43]和Liu C^[44]等设计制备了两种不同结构的开关,它们都包括两个半圆形的主电极,但是触发电极区分单、双结构。研究结果表明:相较于常用SBD单次触发高压开关,这两种结构的平面火花隙三电极高压开关均能降低触发电压、提高峰值电流及缩短延迟时间,同时具有双触发电极的开关性能更优越。

2013年曾庆轩^[45]、吕军军^[46]等共同制备了具有多个不同间隙的平面火花隙三电极高压开关。作者在不同氮气压力下,研究平面火花隙开关的电气性能,结果表明:开关的自击穿电压与氮气压力和间隙的乘积呈线性关系;当工作电压为自击穿电压的70%~90%时,开关延迟短、抖动小,性能较为稳定;与商用立体火花隙高压开关相比,该开关所在发火回路的电感较小,但电阻较大。2016年,李志浩^[47]为了减小开关体积、提高开关可靠性,使用环氧树脂作为填充材料,对平面火花隙三电极高压开关设计制备并进行性能表征,但由于选用作填充材料的环氧树脂的绝缘强度较大,阻碍了开关触发电压的减小。

2018年,陈楷^[16]依据传统气体开关的工作模式,采用MEMS工艺直接刻蚀PCB覆铜板以及利用LTCC工艺分别设计并制备了平面火花隙三电极高压开关,研制的开关的两主电极具有单弧道和多弧道两种结构,其中,采用LTCC工艺制备的开关如图8所示。

开关在氩气和空气两种氛围下,自击穿电压与主电极间隙均呈线性正相关,而电极形状对自击穿电压的影响不大;开关工作电压在其自击穿电压的78%~92%时,延迟时间最短;在空气环境下,多弧道开关相

比单弧道开关可提高峰值电流和缩短延迟时间;随工作电压增加,两种结构的开关主回路的等效电感及电阻均变化不大,平均电感约为 72 nH,平均电阻约为 120 mΩ;同时在空气环境下,所研制两种开关的峰值电流、延迟时间、放电周期以及固有电感均优于立体火花隙高压开关。这些结论说明研制的开关可以替代立体火花隙高压开关作为 McEFIs 用开关,同时该开关更有利于 McEFIs 的集成化与低成本化。

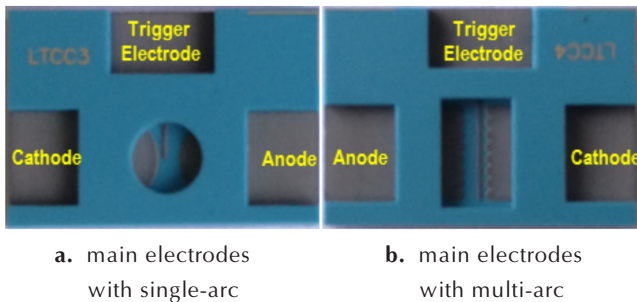


图 8 LTCC 平面火花隙三电极高压开关^[16]
 Fig.8 Planar triggered spark gap switch based on LTCC technology^[16]

4 平面高压开关集成微芯片爆炸箔起爆器

采用 MEMS 和 LTCC 工艺将 McEFI 与平面高压开关等集成设计制备,省去了 McEFI 与平面高压开关间的连接导线或扁平电缆,从而降低了发火回路的寄生电阻和电感,提高了 McEFI 的发火感和能量利用率,因而成为一个重要研究方向。

1998 年, O'Brien D W 等^[48]在其专利中介绍了一种采用薄膜沉积技术一体化集成高压电容、平面高压开关及 McEFI 的全固态 CDU, 如图 9 所示。

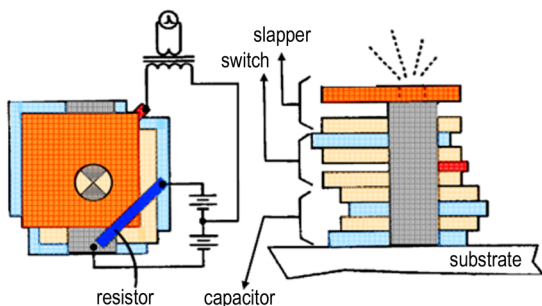


图 9 全固态电容放电单元结构示意图^[48]
 Fig.9 Schematic diagram of complete solid-state CDU structure^[48]

高压电容由在基板上交替沉积的金属层和电介质层组成,层数可根据电容值确定,且金属层之间形成错位,以方便电连接。平面高压开关的触发极在电脉冲

的作用下可以击穿三层电绝缘层导通短脉冲大电流, CDU 还包含了用于泄放电容中杂散电流的电阻以及平面高压开关的触发电路。但发明人没有给出该系统的具体参数和发火性能。

2005 年, Nickolin 等^[49]在第 49 届引信年会上提出了将平面火花隙三电极高压开关和 McEFI 集成构造的设想。美国 e2v 公司^[50]公布了采用陶瓷贴片电容和三电极开关集成的脉冲功率源,减小了系统体积和发火能量。2007 年和 2008 年, 荷兰 TNO 的 Scholtes J H G^[51]、Prinse W C 等^[52]公布的 McEFIs, 将电容、开关及 McEFI 集成在一个基板上。体积缩小至 8 cm³; 发火电压减小为 1.3 kV, 发火能量小于 0.05 J; 发火回路能量利用率达到约 90%。2011 年, Baginski T A 团队^[38]研究了平面火花隙三电极高压开关, 并以该开关为基础提出了如图 10 所示的 CDU 构想。

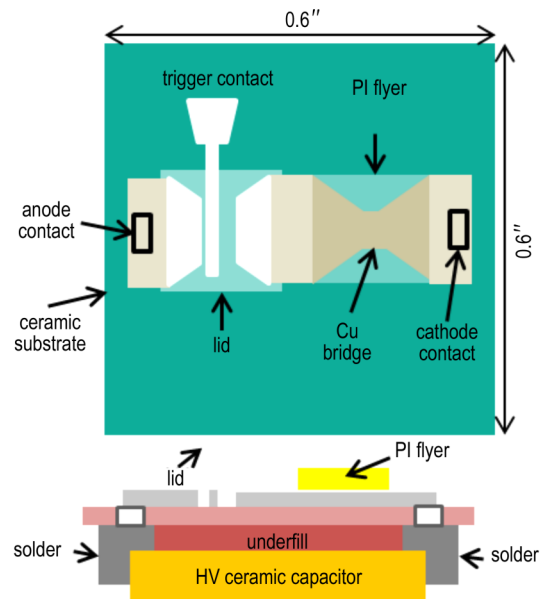


图 10 基于平面火花隙三电极高压开关的电容放电单元示意图^[38]
 Fig.10 Schematic diagram of CDU based on planar triggered spark gap switch^[38]

平面开关和 McEFI 一体化加工在 Al₂O₃ 陶瓷基板上部, 开关的三个电极和爆炸桥箔的表面由一层绝缘介质材料 (PI) 覆盖, PI 在开关中作为绝缘介质、在 McEFI 中作为飞片层, 高压电容贴附在陶瓷基板下部, 并通过导线连接, 从而实现贴片高压电容、高压开关和 McEFI 发火回路的全集成。但是有关技术细节并没有公开, 开关与 McEFI 集成技术尚不成熟, 如作者所言, 仍停留在概念设计阶段。

2011 年, 周密等^[53]研究了平面电爆炸高压开关, 并与 McEFI 集成, 与立体火花隙高压开关进行电爆炸

性能试验的对比研究,结果表明:集成平面电爆炸高压开关的 McEFI 的放电参数与使用立体火花隙高压开关的基本一致,即该平面高压开关可以代替火花隙开关完成起爆及点火要求,且该开关对 McEFIs 的小型化、集成化及低成本化有优势。但从封装结构看,开关和 McEFI 的集成度还不高。

2017年,徐聪等^[24],采用 MEMS 技术将肖特基势垒二极管单次触发高压开关与 McEFI 集成,首次实现了平面高压开关集成 McEFI 的制备,如图 11 所示。

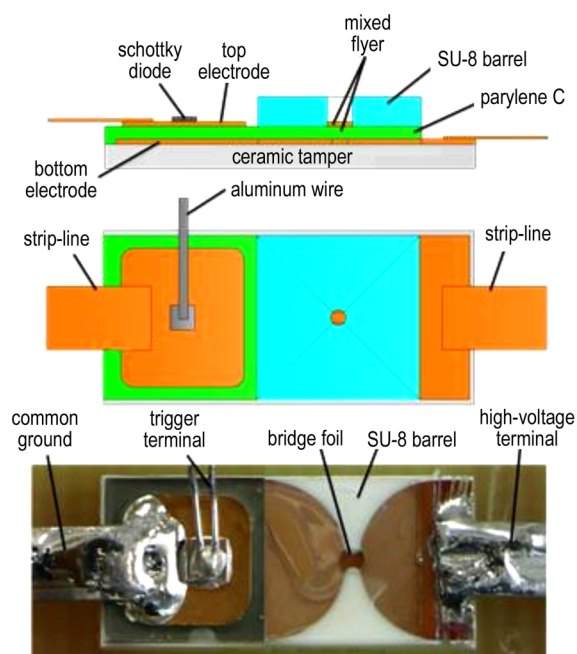


图 11 微芯片爆炸箔起爆器及其肖特基二极管单次触发高压开关的集成结构^[24]

Fig.11 Integrated structure of McEFI & Planar High-voltage Switch with SBD Trigger^[24]

对于集成结构,开展了飞片速度、电学性能及起爆效果的试验研究。其中,起爆测试的主回路发火电压为 1.4~1.8 kV,主回路使用 0.22 μF 发火电容,结果表明集成结构可成功起爆 HNS 的最小主电压为 1.4 kV,起爆前后照片如图 12 所示。

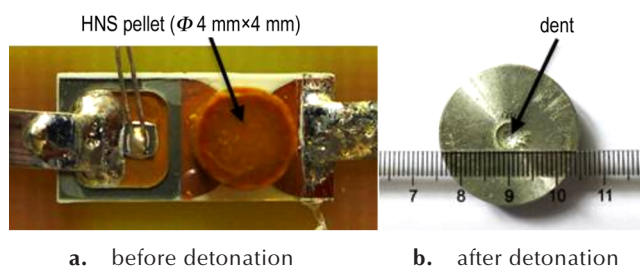


图 12 1.4 kV/0.22 μF 下起爆前后照片^[24]

Fig.12 Photos before and after detonation at 1.4 kV/0.22 μF ^[24]

5 结束语

总结了国内外 McEFI 及其平面高压开关的研究进展:基于 MEMS 工艺,国内外对于 McEFI 及其平面高压开关的研究正朝工程化方向迈进;基于 LTCC 工艺制备 McEFI 及其平面高压开关正处于技术优化阶段。

随着武器系统对 McEFIs 小型化、低能量化的需求日益迫切,在保证系统作用可靠性的前提下,提高 McEFIs 集成度、降低 McEFIs 发火能量将成为新的研究趋势。基于研究现状,建议未来对于 McEFIs 的研究重点包括以下几个方面:

(1) 采用 LTCC 工艺,一体化烧结制备具有独石结构的平面高压开关和 McEFI。

(2) 研发新的高压开关,如 IGBT 和 MCT 半导体高压开关,为 McEFIs 提供更多可供选择的开关。

(3) 采用 LTCC 工艺,制备小体积、高性能的 LTCC 平面升压器,取代目前体积较大的绕组升压器。

(4) CDU 进一步集成升压器,并采用现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)模块控制发火回路,制备基于 McEFIs 的电子安全与解除保险装置(Electronic Safing & Arming Device, ESAD)。

参考文献:

- [1] 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. 福建, 福州:2017: 106-113.
HE Si-min, HE Xiao-dong, WEN Jian-rong, et al. Performance research on energy matching and detonation simultaneity of a novel CDU and slapper detonator[C]//The 19th Academic Annual Meeting of the Pyrotechnics Committee of China ordnance Society. Fujian, Fuzhou:2017:106-113.
- [2] 韩克华, 周俊, 任西, 等. 高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律[J]. 含能材料, 2014(6): 828-833.
HAN Ke-hua, ZHOU Jun, REN Xi, et al. Effect of high voltage pulse power source equivalent parameter on exploding performance of foil bridge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014(6): 828-833.
- [3] 2017 选型指南 火炬牌军用电容器[M]. 福建: 福建火炬电子科技股份有限公司, 2017.
2017 Selection guide torch military capacitors[M]. Fujian: Fujian Torch Electron Technology CO., LTD, 2017.
- [4] 瓷介电容器产品手册&选型指南[M]. 成都: 成都宏明电子科大新材料有限公司, 2018.
Ceramic capacitor manual & selection guide[M]. Chengdu: Chengdu Hongming & UESTC New Materials CO., LTD, 2018.
- [5] 韩克华, 任西, 周密, 等. 高压脉冲电容器性能参数优选实验方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(3): 22-25.
HAN Ke-hua, REN Xi, ZHOU Mi, et al. Study on the characteristics parameters optimization experiment with measurement method for high voltage pulsed power capacitor[J]. *Explosive*

- Materials*, 2011, 40(3): 22-25.
- [6] Nerheim E, Hoff D. Integrated silicon secondary explosive detonator: US 4862803A[P]. 1989.
- [7] Hebderson J H, Baginski T A. Two novel monolithic silicon substrate slapper detonators[C]//Industry Applications Society Meeting, 1993. Conference Record of the. IEEE, 1993, 3: 2479-2482.
- [8] 施志贵, 杨芳. 硅集成冲击片雷管的研制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(增刊): 469-471.
SHI Zhi-gui, YANG Fang. Development of an integrated silicon slapper detonator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(Suppl.):469-471.
- [9] 郭菲, 施志贵, 蒋小华, 等. 硅集成爆炸箔组件起爆 HNS-IV 试验研究[J]. 火工品, 2009(6): 5-7.
GUO Fei, SHI Zhi-gui, JIANG Xiao-hua, et al. The test research on the initiation of HNS-IV by an integrated silicon exploding foil assembly[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(6): 5-7.
- [10] 施志贵, 郭菲, 席仕伟, 等. 一种金属桥冲击片雷管集成制造方法[J]. 火工品, 2010(3): 1-3.
SHI Zhi-gui, GUO Fei, XI Shi-wei, et al. A method for fabricating an integrated metal slapper detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(3): 1-3.
- [11] Desai A. Efficient exploding foil initiator and process for making same: US 7938065[P]. 2011.
- [12] 房旷, 陈清畴, 贺思敏, 等. 一种原位集成冲击片组件的制备及飞片驱动性能[J]. 含能材料, 2016, 24(1):101-105.
FANG Kuang, CHEN Qing-chou, HE Si-min, et al. Fabrication and flyer driving capability of in-situ integrated exploding foil initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(1): 101-105.
- [13] 曾庆轩, 郑志猛, 李明愉, 等. 爆炸箔芯片集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012(5): 1-3.
ZENG Qing-xuan, ZHENG Zhi-meng, LI Ming-yu, et al. Research on fabrication method of integrated slapper detonator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(5): 1-3.
- [14] 李可为, 褚恩义, 薛艳, 等. 基于非硅微制造工艺的爆炸箔起爆器研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 261-266.
LI Ke-wei, CHU En-yi, XUE Yan, et al. Research on exploding foil initiator based on non-silicon MEMS technology [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(2): 261-266.
- [15] 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.
CHEN Kai, XU Cong, ZHU Peng, et al. Influence of barrel and multilayer flyer of micro chip exploding foil initiator on its performance [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 273-278.
- [16] 陈楷. 集成爆炸箔起爆器与平面三电极高压开关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
CHEN Kai. Research on the technique of micro chip exploding foil initiator and planar three electrodes high voltage switch[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [17] 童志义. 低温共烧陶瓷技术现状与趋势[J]. 电子工业专用设备, 2008, 37(11): 1-9.
TONG Zhi-yi. The technique status and trend of LTCC [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2008, 37(11): 1-9.
- [18] Zhu P, Chen K, Xu C, et al. Development of a monolithic micro chip exploding foil initiator based on low temperature co-fired ceramic[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.032>.
- [19] Chu K W, Scott G L. A comparison of high-voltage switches, SAND99-0154[R]. Sandia National Laboratories, 1999.
- [20] 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.
ZENG Qing-xuan, LI Shou-dian, YUAN Shi-wei, et al. Research progress of high-voltage switches in exploding foil initiators [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(1): 202-205.
- [21] 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.
ZHOU Mi, MENG Qing-ying, HAN Ke-hua, et al. Design and research on exploding plane switch [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(6):12-14.
- [22] Baginski T A, Thomas K A. A robust one-shot switch for high-power pulse applications [EB / OL]. <https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2008/fuze/IIIBaginski.pdf>
- [23] 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.
- [24] Xu C, Zhu P, Chen K, et al. A highly integrated conjoined single shot switch and exploding foil initiator chip based on MEMS technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(11): 1610-1613.
- [25] Earley L M, Scott G L. Low-cost, 3 kV, triggered, stripline, surface-discharge switch [C]//Pulsed Power Conference, 1991. Digest of Technical Papers. Eighth IEEE International. IEEE, 1991: 340-342.
- [26] Nerheim E. Integrated silicon plasma switch: US 4840122A [P]. 1989.
- [27] 张欢. 平面固态高压单触发开关的设计、制作与性能研究[D]. 南京理工大学, 2012.
ZHANG Huan. Design, fabrication and performance study of planar solid-state high voltage single shot switch[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [28] 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): 2563-2571.
- [29] 胡博. 适用于爆炸箔起爆器的电爆炸等离子体开关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
HU Bo. Research on the electro-explosive plasma switch applied for explosive foil initiator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [30] 胡博, 沈瑞琪. 平面固态单触发高压开关电极形状优化与设计 [C]//2012 全国兵器科学与技术博士生学术论坛. 江苏, 南京: 2012.
HU Bo, SHEN Rui-qi. Optimization and design of electrode shape of planar solid-state high voltage single shot switch [C]// 2012 National Doctoral Academic Forum for Armament Science and Technology. Jiang Su, Nan Jing: 2012.
- [31] 朱朋, 胡博, 沈瑞琪, 等. 用于爆炸箔起爆器的肖特基结平面爆炸开关及其制备方法: CN, CN103344151A [P]. 2013.
ZHU Peng, HU Bo, SHEN Rui-qi, et al. Planar explosion switch with SBD used for EFI and its preparation method: CN 103344151A [P]. 2013.
- [32] Hu B, Jiao J, Zhu P, et al. Characterization of electrical explosion of schottky diode for one-shot switch applications [J]. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 2014, 68(3):30801.
- [33] 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.

- Hu Bo, Li Jie, Zhu Peng, et al. Experimental investigation of one-shot switch based on parylene C [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 233-237.
- [34] 胡博, 朱朋, 沈瑞琪, 等. 封装材料对单触发开关的性能影响研究[J]. *爆破器材*, 2016(1): 22-25.
- Hu Bo, Zhu Peng, SHEN Rui-qi, et al. Experimental study on the effect of the packaging material on switch characteristics of one-shot switch[J]. *Explosive Materials*, 2016(1): 22-25.
- [35] Waschl J A, Hatt D J. Characterization of a small-scale exploding bridge foil flyer generator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1-4):785-796.
- [36] Woodworth J, Stygar W, Bennett L, et al. New low inductance gas switches for linear transformer drivers [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 10.1103/PhysRevSTAB.13.080401.
- [37] Baginski T A. Integrated spark gap device: US 6977468B1[P]. 2005.
- [38] 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):1480-1485.
- [39] 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.
- WANG Gui-ji, WU Gang, ZHAO Jian-heng, et al. Development on planar spark gap switch with three electrodes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 349-352.
- [40] 丁桂甫, 周镇威, 杨卓青, 等. 微型平面式气体火花隙开关: CN, CN101814701A[P]. 2010.
- DING Gui-fu, ZHOU Zhen-wei, YANG Zhuo-qing, et al. Micro planar gas spark switch: CN 101814701A[P]. 2010.
- [41] 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): 1256-1260.
- ZHOU Zhen-wei, YANG Zhuo-qing, DING Gui-fu, et al. Design and fabrication of micro planar gas spark switch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5): 1256-1260.
- [42] Zhao X, Zhou Z, Ding G, et al. A planar micro spark gap switch with a triggering electrode [J]. *Micro & Nanosystems*, 2011, 3(4).
- [43] Shen H, Ding G F, Zhou Z W, et al. A micro triggered spark gap switch with three electrodes [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 694: 485-489.
- [44] Liu C, Yang Z, Ding G, et al. Design, Simulation, and characterization of a low-cost in-plane spark gap microswitch with dual-trigger electrode for pulsed power applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8):3240-3247.
- [45] 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.
- [46] Lv J, Zeng Q, Li M. Metal foil gap switch and its electrical properties [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4):150-154.
- [47] 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.
- LI Zhi-hao. The technical research on planar solid high-voltage switch in exploding foil initiating system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [48] O'Brien D W, Druce R L, Johnson G W, et al. Method and system for making integrated solid-state fire-sets and detonators: US 5731538A[P]. 1998.
- [49] Nickolin. ESAD technology benefits to ISD [C]//49th Annual Fuze Conference, Seattle, Washington, 2005.
- [50] e2v, Inc. e2v ordnance safety and arming (OS&A) capability overview [EB/OL]. <http://www.e2v.com/products-and-services/rf-power-solutions/safety-and-arming-devices>, 2009-01-02.
- [51] Scholtes J H G, Prinse W C, Bouma R H B, et al. Development of exploding foil initiators for future IM [C]//2007 Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium (IMEMTS): "New Programs, New Policies, New Strategies leading to New Joint Solutions", Miami, FL, USA, 15-48 October 2007, 9p.(article)+21 sheets.
- [52] Prinse W, Scholtes G. A development platform for a microchip EFI [C]//52th Annual Fuze Conference. Kansas City, 2008, 3: 13-15.
- [53] 周密, 任西, 钱勇, 等. 平面开关与爆炸箔的集成设计及研究 [J]. *火工品*, 2011(5): 33-35.
- ZHOU Mi, REN Xi, QIAN Yong, et al. Study on integration of plane switch and exploding foil [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(5): 33-35.

Review on Micro Chip Exploding Foil Initiator and Its Planar High-voltage Switch

YANG Zhi, ZHU Peng, XU Cong, ZHANG Qiu, QIN Xin, SHEN Rui-qi

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Each technology upgrading of Exploding Foil Initiator system (EFIs) is accompanied with the innovation of design concepts and manufacture processes, especially the technologies of Micro Electro Mechanical System (MEMS) and Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) greatly promote the development of Micro Chip Exploding Foil Initiator system (McEFIs). The advantages and disadvantages of Micro Chip Exploding Foil Initiator (McEFI) fabricated by two kinds of processes were briefly analyzed. The working performances of several planar high-voltage switches in Capacitor Discharge Unit (CDU) were listed, and the feasibility of manufacture idea and research method of the switch is obtained. The research progress at home and abroad based on the preparation of MEMS process and LTCC process, and the study of McEFI, planar high-voltage switch as well as planar high-voltage switch integrated with McEFI was summarized respectively. Key research directions were put forward. In-depth research of the fabrication of McEFI and its planar high-voltage switch by the MEMS process will achieve engineering application. The planar high-voltage switch & McEFI with monolithic structure can be fabricated by LTCC technology.

Key words: Micro Chip Exploding Foil Initiator system (McEFIs); capacitor discharge unit; Micro Chip Exploding Foil Initiator (McEFI); planar high-voltage switch; research progress

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018146