

文章编号: 1003-1480 (2020) 06-0010-04

# 基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片

薛艳<sup>1</sup>, 刘云<sup>2</sup>, 任炜<sup>1</sup>, 任小明<sup>1</sup>, 刘兰<sup>1</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2. 北方特种能源集团有限公司, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 针对 MEMS 火工品低能化带来的安全性问题, 设计了一种基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片, 采用 MEMS 工艺制作了 Ni-Cr 换能元层、绝缘层、导线层, 一体化集成了含平面开关的安全起爆芯片; 通过对形貌、表面粗糙度、厚度等进行表征分析, 确定了结构参数, 并对安全起爆芯片性能进行了测试。结果表明 MEMS 平面开关实现了通断转换, 可以提高安全起爆芯片的安全性。本研究为 MEMS 火工品安全性技术提供支撑。

**关键词:** 安全起爆芯片; MEMS 技术; Ni-Cr 换能元; 性能测试

中图分类号: TJ45<sup>+</sup>9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.003

## Research on Safe Detonation Chip Based on MEMS Technology

XUE Yan<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>2</sup>, REN Wei<sup>1</sup>, REN Xiao-ming<sup>1</sup>, LIU Lan<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. North Special Energy Group Co.Ltd., Xi'an, 710061)

**Abstract:** Aiming at the safe problem followed by the low energy of MEMS pyrotechnic, a safe detonation chip based on MEMS process was designed. The Ni-Cr heater, insulating layer and circuit layer were made by MEMS process, and the safe detonation chip with planar switch was integrated. The performance analyses of morphology, surface roughness, thickness, etc. were carried out, then the structural material parameters were determined, meanwhile, the performance of the safe detonation chip were tested. The results show that the MEMS switch realizes the on-off conversion, so the safety of the safe detonation chip can be improved. The study provides support for the safety technology of MEMS pyrotechnic products.

**Key words:** Safety detonation chip; MEMS technology; Ni-Cr heater; Performance test

MEMS 火工品 (MEMS Pyrotechnics) 是将 MEMS 技术、微纳米材料技术与火工品技术相结合的产物, 其特点为换能结构和药剂结构尺度在微米量级, 核心器件尺度在亚毫米量级, 系统尺度在毫米量级的火工品<sup>[1-2]</sup>。随着 MEMS 火工品向低能化、微型化、集成化发展, MEMS 火工品在装配、勤务处理中易受静电、杂散电流等影响, 造成意外发火。2001 年美国提出一种通过集成电感、电路和电容元件提高半导体桥火工品安全性的方法, 实现对杂散电流、电磁信号的过滤<sup>[3]</sup>。2010 年法国 LAAS-CNRS 实验室将 MEMS 开关

与火工芯片集成, 提升了火工品的安全性<sup>[4-6]</sup>。2015 年陕西应用物理化学研究所研制了一种 MEMS 电热常闭开关器件, 可以对起爆换能元形成安全保护, 以提升 MEMS 火工品安全性<sup>[7]</sup>。

以上研究表明, 如何提高 MEMS 火工品在低能化、小型化、集成化条件下的安全性是 MEMS 火工品技术发展方向之一。本文针对该研究方向设计了一种基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片, 通过对形貌、表面粗糙度等进行表征分析, 确定结构参数, 并对安全起爆芯片安全性能、起爆性能进行了测试分析。

收稿日期: 2020-10-18

作者简介: 薛艳 (1981 -), 女, 高级工程师, 主要从事 MEMS 火工品技术研究。

## 1 安全起爆芯片设计

### 1.1 MEMS 火工品安全特性

随着第一代机械火工品(火帽、针刺雷管等)、第二代电热火工品(桥丝、桥带电火工品等)到第三代非线性火工品(爆炸箔、激光火工品等)技术的发展,火工品自身的安全性随着火工品作用机理的发展逐步提高,但在实际应用中仍不能满足武器系统对安全性的要求。以 MEMS 火工品为代表的第四代灵巧火工品具有低能化、微型化、模块化的特点,所采用的药剂大多为敏感起爆药(如叠氮化铜)<sup>[1,8]</sup>,因此使得 MEMS 火工品的安全性大大降低。传统的安全性措施主要有加装机械隔板、制作电路、加装二极管等,但在加工工艺、体积模块、集成化方面与 MEMS 火工品工艺、功能不兼容,在 MEMS 火工品中无法应用。

本文结合 MEMS 火工品特性,通过进行 MEMS 工艺兼容性分析,设计了一种基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片;通过 MEMS 平面开关和导线层线路控制,完成 MEMS 平面开关的通断转换,实现对起爆换能元安全保护,提高安全起爆芯片的安全性。

### 1.2 安全起爆芯片设计

基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片由起爆换能元和 2 个独立作用的 MEMS 平面开关组成,具体结构示意图如图 1 所示。

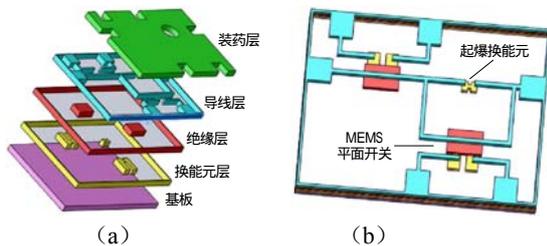


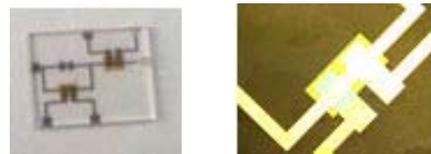
图 1 安全起爆芯片结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the safe detonation chip

未作用时安全芯片两端接地,保证安全,当起爆换能元需要作用时, MEMS 平面开关实现通断转换,切断起爆换能元短路保护,电能施加到起爆换能元上,实现起爆作用;在特殊情况下,需要使起爆换能元失效, MEMS 平面开关作用,永久切断起爆换能元能量来源,实现绝火功能。

## 2 安全起爆芯片集成及表征分析

### 2.1 一体化集成制作

安全起爆芯片的制作主要包括微结构换能元层、绝缘层、导线层的制作。微结构换能元层的制作过程:(1)清洗 Pyrex 玻璃基底;(2)非平衡磁控溅射 Ni-Cr 薄膜;(3)通过匀胶、光刻、显影等工艺形成换能元图形结构;(4)刻蚀液刻蚀,清洗,得到 Ni-Cr 换能元。绝缘层制作过程:(1)气相沉积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜;(2)匀胶、坚膜、光刻、显影形成绝缘层图形结构;(3)干法刻蚀制作出  $\text{Si}_3\text{N}_4$  绝缘层图形,清洗,得到绝缘层图形。导线层的制作过程:(1)非平衡磁控溅射 Cu 薄膜;(2)匀胶、坚膜、光刻、显影形成导线层结构;(3)刻蚀液刻蚀,清洗,得到 Cu 导线层。制作出的安全起爆芯片如图 2 所示。



(a) 一体化集成 (b) 单个 MEMS 平面开关  
图 2 安全起爆芯片一体化集成及单个 MEMS 平面开关  
Fig.2 Safe detonation chip and single MEMS planar switch

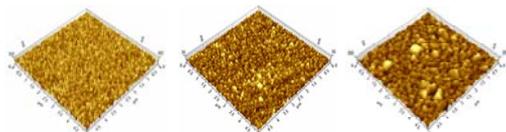
### 2.2 性能表征

通过奥林巴斯激光共聚焦显微镜 5100、安捷伦 5500 原理力显微镜、DEKTAK150 台阶仪,对微起爆器件关键原件 MEMS 平面开关进行分析,形貌、粗糙度、厚度性能测试结果分别如图 3~5 所示,设计参数与测试结果对比如表 1 所示。

根据图 3~5 及表 1 可见换能元图形清晰,边缘规整,具有一定的致密性,表面粗糙度最小仅为几个纳米,最大也小于 35nm,表面颗粒均匀,具有较好的表面粗糙度特性;表 1 设计参数与测试的结构尺寸相吻合,误差小于 6%,说明通过 MEMS 工艺一体化集成的 MEMS 平面开关具有一定的工艺稳定性。

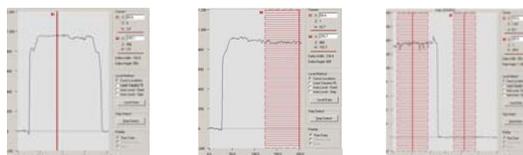


(a) 换能元 (b) 绝缘层 (c) 导线层  
图 3 MEMS 平面开关部件形貌示意图  
Fig.3 The morphology analysis on components of MEMS planar switch



(a) 换能元 (b) 绝缘层 (c) 导线层  
图 4 MEMS 平面开关部件粗糙度示意图

Fig.4 The surface roughness of components of MEMS planar switch



(a) 换能元 (b) 绝缘层 (c) 导线层  
图 5 MEMS 平面开关部件厚度测试结果

Fig.5 The thickness of components of MEMS planar switch

表 1 MEMS 平面开关参数对比

Tab.1 Structure parameters of safe detonation chip

	结构参数/ $\mu\text{m}$		粗糙度 /nm	厚度/ $\mu\text{m}$	
	设计	测试		设计	测试
换能元	100 × 120	100.1 × 120.2	15.1	0.9	0.95
绝缘层	600 × 2 000	600.8 × 2 000.5	3.85	2.0	2.11
导线层	60	60.2	32.5	1.3	1.34

### 3 安全起爆芯片性能测试

#### 3.1 MEMS 平面开关仿真计算及验证

MEMS 平面开关为分层式结构，基底层为 Pyrex7740 玻璃，换能元层为 Ni-Cr 薄膜，绝缘层为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜，导线层为 Cu 薄膜。Ni-Cr 薄膜通电产热，热量穿过绝缘层熔断 Cu 薄膜，使开关实现由闭合转为断开。建立 MEMS 平面开关的计算模型<sup>[7]</sup>，进行了温度分布计算，图 6 为 MEMS 平面开关通电后的温度分布计算结果，可以看出最高温度分布在桥区位置，持续通电 0.01s 可升温至 637，该温度足够将导线层熔断，实现 MEMS 平面开关的通断转换。

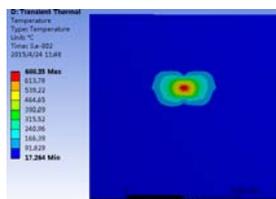


图 6 MEMS 平面开关的温度分布

Fig.6 Temperature distribution of MEMS planar switch

通过菲力尔公司 (FLIR) 红外热波 sc3000 设备测量了 MEMS 平面开关在 1A 电流条件下的温度分布，如图 7 所示，计算了 MEMS 平面开关的对流换热系数随温度变化的曲线。由图 7 看出 Ni-Cr 换能元在 1A 电流条件下，桥区温度可以达到 620 以上，可以满足电热开关通断的能量要求，仿真与测试结果

吻合。

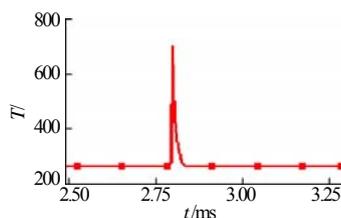


图 7 MEMS 平面开关微区温度变化曲线

Fig.7 Temperature vs time of MEMS planar switch micro-zone

#### 3.2 安全起爆芯片性能测试

对 MEMS 平面开关在 1A 电流条件下进行了通断性能测试，试验结果如表 2 所示，通电后开关的温度迅速升高，可靠完成线路的通-断转换，表明 MEMS 平面开关实现了安全保护功能。

表 2 MEMS 平面开关作用前后电阻参数

Tab.2 The resistance parameters of MEMS planar switch before and after action

样品	平面开关电阻 / $\Omega$	起爆换能元电阻/ $\Omega$		功能
		开关作用前	开关作用后	
1	28.7	1.2*	8.6	实现了 安全保护 功能
2	58.5	1.2*	8.6	
3	57.8	1.1*	8.7	
4	29.3	1.1*	8.5	
5	28.1	1.2*	8.7	

注：\*表示线电阻。

MEMS 平面开关作用前后的显微照片如图 8 所示，作用前 MEMS 平面开关光滑平整、图形清晰，作用后有明显烧蚀现象，导线层断裂。



(a) 作用前 (b) 作用后

图 8 MEMS 平面开关作用前后显微照片

Fig.8 Micrographs of the MEMS planar switch before and after action

对安全起爆芯片的发火性能和作用时间进行测试并计算安全起爆芯片的发火能量。其测试结果如图 9、表 3 所示。

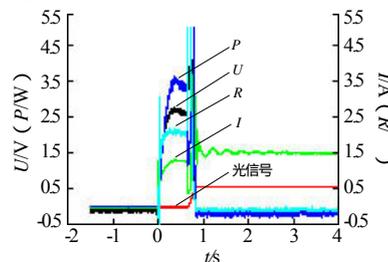


图 9 安全起爆芯片发火过程测试结果

Fig.9 Test results of the ignition process of the safe detonation chip

表 3 安全起爆芯片测试结果

Tab.3 Test results of the safe detonation chip

样品量	全发火电流/A	全发火电压/V	作用时间/ $\mu\text{s}$
16	1	5	27.2

根据测试结果,计算安全起爆芯片的发火能量,采用电容发火,当水银开关闭合时,起爆换能元的电压、电流立即快速上升,作用时间是瞬态的,电阻在此过程未有大的变化。发火能量计算公式为:

$$E(t) = \int_0^t U(t_0)I(t_0)dt_0 \quad (1)$$

式(1)表明发火能量是关于电压、电流、时间的函数,通过积分功率曲线即可获得安全起爆芯片的发火能量,在5V电压、27.2 $\mu$ s作用时间下,计算得到发火能量为0.387mJ。

## 4 结论

(1)本文设计并制造了一种基于MEMS工艺的安全起爆芯片,其具有结构简单、微小型,与MEMS工艺兼容的特点,可以实现一体化集成制作,为MEMS火工品的安全性技术提供了新思路。

(2)通过显微镜、台阶仪等对安全起爆芯片进行表征分析,结果表明其具有一定致密性、较好的表面粗糙度特性,结构尺寸与设计尺寸相吻合,误差小于6%,安全起爆芯片性能稳定。

(3)通过对安全起爆芯片发火过程进行测试,得到安全起爆芯片全发火电流为1A,全发火电压为5V,作用时间为27.2 $\mu$ s,发火能量为0.387mJ,表明在低能化条件下,MEMS平面开关实现了通-断转换,

提高了安全起爆芯片的安全性。

### 参考文献:

- [1] 褚恩义,张方,等.第四代火工品部分概念初步探讨[J].火工品, 2018(1): 1-5.
- [2] 褚恩义,贺爱锋,任西,薛艳,等.火工品集成技术的发展机遇与途径[J].含能材料, 2015, 23(3): 205-207.
- [3] Duguet, Jean-Rene, et al.. Electro-pyrotechnic initiation system protected against electrostatic discharges: US, 6220163B1[P]. 2001-04-24.
- [4] Pierre Pennarun, Carole Rossi, et al.. Single use, robust, MEMS based electro-thermal microswitches for redundancy and system reconfiguration[J]. Sensors and Actuators A, 2007(B6): 273-281.
- [5] Grant Moule. Susan Franciscus. OICW fire control system[C]// 34th Annual Gun & Ammunition Symposium & Exhibition. New Orleans, USA, 2003.
- [6] Chopin Hua. Low-cost MEMS initiators[C]//NDIA 54th Annual Fuze Conference. Kansas City, Missouri, USA, 2010.
- [7] 平川,张蕊,薛艳,等.MEMS电热常闭开关的设计和性能研究[J].火工品, 2015(1): 10-13.
- [8] 薛艳,刘卫,解瑞珍,等.基于MEMS工艺的微起爆器性能研究[J].火工品, 2020(1): 14-17.