

文章编号 1004-924X(2018)09-2319-07

微机电火工品薄膜结构换能元

任 炜^{1,2*}, 赵玉龙¹, 褚恩义², 张 彬², 李 慧²

- (1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要:为了满足 MEMS 火工品的小型化、集成化和低能发火等要求,本文基于 MEMS 技术,设计了一种平面“蛇”形结构的薄膜换能元,采用磁控溅射等 MEMS 薄膜制作技术,完成了不同薄膜桥区电阻和基底材料薄膜换能元样品的制备,采用扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM),低电阻测试仪、红外热像仪等设备,完成了不同换能元样品结构(薄膜桥区线宽、长度及厚度等)及性能(电阻、电热响应等)参数的测试与表征。通过分析研究,获得了薄膜桥区电阻材料、基底材料、薄膜厚度以及桥区结构形状对换能元性能的影响规律,优选确定以金属 Pt 和 7740 玻璃作为换能元电阻及基底材料,发火性能达 5 V/33 μ F,满足 MEMS 火工品的低能化要求。

关键词: MEMS, 薄膜结构, 换能元, 薄膜厚度

中图分类号: TB853. 29 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20182609. 2319

Film structure energy conversion components for MEMS initiators

REN Wei^{1,2*}, ZHAO Yu-long¹, CHU En-yi², ZHANG Bin², LI Hui²

- (1. SKL of mechanical manufacturing system engineering, Xi'an JIAOTONG University, Xi'an 710054, China;
 2. SKL of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)
- * Corresponding author, E-mail: rx0192@163.com

Abstract: In order to meet the requirements of miniaturization, integration, and low energy of MEMS initiators, based on MEMS technology, a planar film structure energy conversion component with a “snake-shape” was designed. Using magnetic sputtering and other MEMS production technologies, we prepared energy conversion components with different resistive and base materials. Then, using scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), a low resistance tester, an infrared thermal imager, and other equipment, we obtained the characterization parameters and the performance of different element samples (such as the width, length, and thickness of the film bridge area and the resistance, electro-thermal response, etc.). Through analysis and study, the influences of the resistive material, base material, thickness of the film, and bridge shape with the performance of the energy conversion component were obtained; metal Pt and 7740 glass was preferred, which ignite at 5 V/33 μ F, and meet the low-energy requirements of MEMS initiators.

Key words: MEMS; film structure; energy conversion components; film thickness

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-10.

基金项目: 装备预研资助项目(No. 41419080302); 国防科技重点实验室基金资助项目(No. 9140C370504150C37175)

1 引言

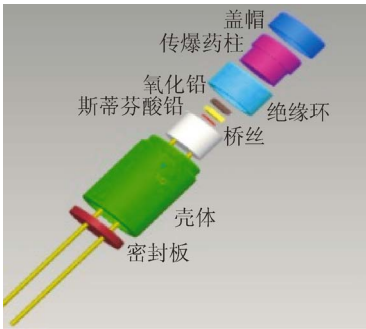
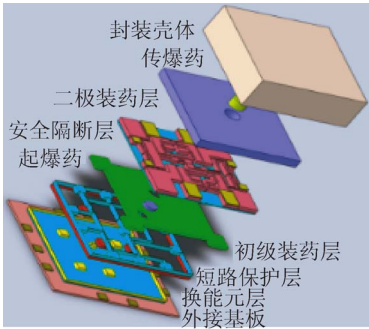
火工品由换能元、火工药剂和火工序列构成,是武器系统的始发能源,主要实现起爆、点火和做功等功能,对武器装备的安全性、可靠性和作战效能有重大影响。未来信息化武器弹药要求火工品的激发能量低,空间体积小,传统火工品不能完全满足需求,“微小型、多功能”成为制约火工品技术发展的根本问题。基于 MEMS 技术的 MEMS 火工品是适应武器弹药“微小型、多功能”发展的关键基础技术。与传统工艺制作的火工品相比, MEMS 火工品的设计与制作主要基于 MEMS 技术或采用与 MEMS 工艺相兼容的工艺,实现了火工品换能结构和药剂结构尺度在微米量级,核心器件尺度在亚毫米量级,系统尺度在毫米量级^[1],

其采用 MEMS 封装工艺,可将微发火电路、微作动机构、微换能元、微装药、微序列集成一体,使火工品具备了结构微型化、换能信息化和序列集成化等特征^[2],是新一代火工品的重要发展方向。

薄膜结构换能元作为 MEMS 火工品的核心部分,决定了 MEMS 火工品的发火性能、安全性和可靠性,进而会影响武器弹药的作战效能。MEMS 火工品薄膜结构换能元主要是将半导体或金属等材料沉积到绝缘基片上制作而成,其作用机理与传统桥丝式换能元相近,即利用电阻发热的方式实现外部能量与含能材料的能量传递与方法,但与传统桥丝式换能元相比,其优点是结构微型化、高集成度,与 MEMS 技术相兼容,并可根据发火性能要求设计不同结构、形状的器件样品,保证良好的安全性和点火可靠性,能够批量化生产,便于工艺控制。

表 1 MEMS 火工品与传统火工品的主要区别

Tab. 1 Differences between MEMS and traditional initiators

	Traditional initiators (typical electric-detonators)	MEMS initiators (quasi-plane detonator)
Structure		
Energy conversion components	bridge, wire; 6—18 μm , machining, resistance deviation 10%, initiation energy ≤ 5 mJ	nanometer, micron thin film, 0.2—5 μm , MEMS process, resistance deviation $\geq 5\%$, easy to integrate with IC chip, initiation energy ≥ 1 mJ
Energetic materials	powder compression molding, accuracy 4%, limit initiation dose 15 mg	carbon nanotube self-assembly, in situ loading, accuracy 1%; limit initiation dose 500 μg
Initiators array	detonation/ignition (single function)	information interaction, security control, explosion/transmission (multi-function)
Process	manual assembly, system integration difficulty, large in size	large scale manufacturing, small process deviation, easy integration, small system

MEMS 火工品薄膜结构换能元为平面结构,如图 1 所示,由基底层、薄膜电阻层(桥区)和焊台层组成,其中,基底层为支撑层,薄膜电阻层为发

热层,焊台层主要实现电连通作用,为外部激励能量提供通道。从 MEMS 火工品薄膜结构换能元的结构特点,分析影响其性能的主要因素包括基

底材料^[3-4]、桥区材料、桥区结构^[5-8]以及薄膜厚度^[6]等。

本文研究主要选取 Ni、Cr^[10]、Pt^[11-12]、W^[4]、Cu 和 Al 等 6 种不同金属作为桥区电阻材料,以硅、7740 玻璃作为基底材料,进行了薄膜结构换能元样品的设计与制备,重点研究了桥区不同电阻材料、基底材料、薄膜厚度及桥区结构形状等对薄膜换能元电阻特性、热电响应性能的影响规律,为 MEMS 火工品薄膜结构换能元材料优选与样品设计提供支持。

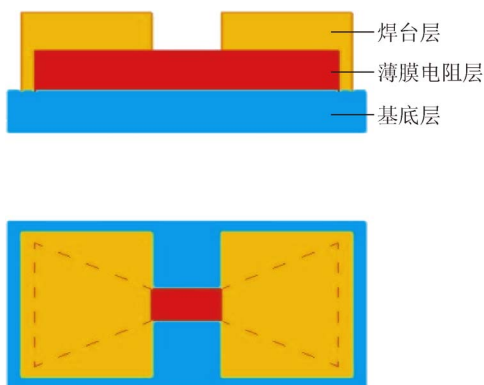


图 1 薄膜结构换能元结构示意图

Fig.1 Structure of thin film structure energy conversion components

2 薄膜结构换能元设计与制备

2.1 薄膜结构换能元的设计

薄膜结构换能元与传统桥丝换能元相比,两者均作为火工品能量转换器件使用,其作用机理相近,即采用焦耳热的形式实现外部激励能量的转换与传递。因此,根据 MEMS 火工品低能发火设计要求,薄膜结构换能元的设计,在重点考虑薄膜结构桥区电阻、质量以及制作工艺等影响的同时,可充分借鉴敏感电热桥丝火工品换能元的设计经验,结合 MEMS 火工品结构特点与序列要求,开展换能元材料初选与桥区结构形状的设计等。

本文具体设计的典型薄膜结构换能元参数如下:设计参考电阻为 1~10 Ω(LD14、LD19 等敏感电火工品电阻);桥区电阻材料选用 Ni、Cr、Pt、W、Cu 和 Al 等 6 种火工品常用金属材料;桥区形状设计一是依据电阻要求,结合不同金属材料电阻率参数,以 Ni、Cr、Pt、W、Cu、Al 的电阻率分别

为 6.8,12.9,10.6,5.5,1.7,2.7 μΩ·cm,为达到设计电阻,设计了如图 2 所示的“蛇”形薄膜换能元,桥区结构尺寸参数为 L×W×t=770 μm×30 μm×400 nm。

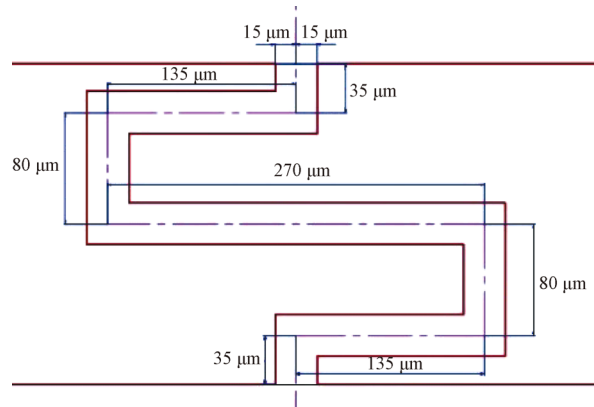


图 2 “蛇”形薄膜结构换能元结构

Fig.2 Snake-shaped structure of thin film structure energy conversion components

需要指出的是“蛇”形薄膜换能元结构尺寸包括桥长 L、桥宽 W、桥厚 t 以及桥距(换能元极距) d,上述参数具体设计:首先依据 MEMS 火工品装药尺寸≥5 mm 的要求,确定换能元极距 d≥0.25 mm,本文设计为 0.23 mm;其次继承传统桥丝换能元设计,确定桥长采用 770 μm(与 LD14 桥长相近);同时考虑加工制作工艺确定桥宽为 30 μm、桥厚为 400 nm。

表 2 不同材料样品的设计电阻值

Tab.2 Design resistance of samples with different materials

material	Ni	Cr	Pt	W	Cu	Al
Design resistance/Ω	4.36	8.28	6.80	3.53	1.09	1.73

$$R = \rho \cdot \frac{1}{wt} \quad (1)$$

利用薄膜电阻计算公式(1),计算得到的 6 种材料样品在设计结构参数下的设计电阻值,均符合换能元的电阻设计范围,数据如表 2 所示。

2.2 薄膜结构换能元的制备

薄膜结构换能元样品的制备主要采用美国丹顿生产的 DISCOVERY635 磁控溅射机进行。

首先,为满足薄膜致密性、均匀性等成膜质量

要求,针对实验选取的不同材料,通过在磁控溅射机上进行了大量工艺探索,确定的不同材料薄膜制作工艺条件及参数,具体如表 3 所示。

表 3 样品溅射工艺条件及参数

Tab. 3 Sputtering process conditions and parameters of sample

Sample	Working current/A	Ar/sccm	vacuum/torr	Sputtering power/W
Ni	0.3	20	2.0×10^{-5}	150
Cr	0.3	20	2.0×10^{-5}	132
Al	0.5	20	2.0×10^{-5}	223
Pt	0.3	20	2.0×10^{-5}	124
Cu	0.3	20	2.0×10^{-5}	143
W	0.5	20	2.0×10^{-5}	160

随后,采用标准 MEMS 制作工艺在硅基底上进行不同材料薄膜结构换能元样品制备,具体工艺流程如图 3 所示,制备得到的典型样品桥区显微镜照片如图 4 所示。

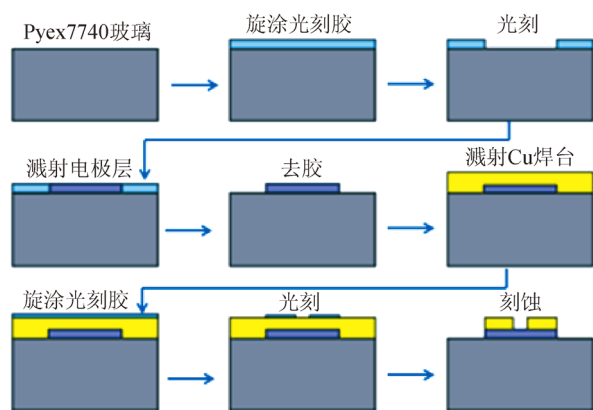


图 3 薄膜结构换能元制作工艺流程

Fig. 3 Manufacture process of thin film structure energy conversion components

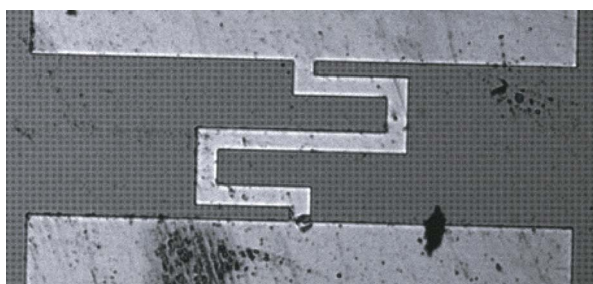


图 4 典型“蛇”形换能元样品

Fig. 4 Typical sample of snake-shaped energy conversion components

3 薄膜结构换能元参数测试与表征

MEMS 火工品薄膜结构换能元参数测试表征包括结构参数和性能参数两部分,其中结构参数表征测试主要为后续性能参数对比分析提供基础数据,性能参数表征主要为换能元样品作用性能判定、材料优选设计等提供支持。

3.1 结构参数测试与表征

MEMS 火工品薄膜结构换能元结构参数主要包括桥区线宽、桥区长度以及薄膜厚度等,其直接影响薄膜结构换能元的电阻大小,进而影响薄膜结构换能元的发火性能。本文结构参数的测试与表征主要利用扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)以及台阶仪等仪器设备进行。

首先,利用 SEM 对薄膜结构换能元样品进行表征测试,获得了样品桥区微观结构及线宽等参数,桥区微观结构如图 5 所示,桥区线宽测试数据见表 4。

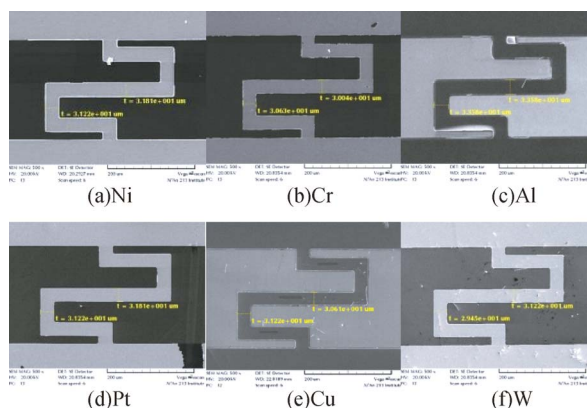


图 5 不同换能元样品桥区的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photos of energy conversion components of different samples

其次,利用台阶仪对薄膜结构换能元样品薄膜厚度进行测试,薄膜厚度测试数据见表 4。

表 4 桥区线宽及膜厚测试数据

Tab. 4 Test data of bridge line width and film thickness

Sample	Ni	Cr	Pt	W	Cu	Al
Bridge line width/ μm	31.22	30.63	31.81	29.45	30.61	33.58
Film thickness/nm	471	411	423	342	374	520

由图 5 可知,不同材料样品结构良好,与所设计结构一致。表 4 中给出的不同材料样品桥区线宽及薄膜厚度测试数据表明,桥区线宽的制作误差控制较好,薄膜厚度偏差约为 100 nm,与制备过程工艺控制相关。

上述结构参数的测试与表征,获得的不同样品的结构尺寸参数,为样品后续性能的分析研究提供了基础数据。

3.2 性能参数测试与表征

薄膜结构换能元主要作为一种电热能量转换器件,本文重点关注其电阻特性以及不同样品在不同输入电流下的响应、临界作用情况等,因此性能参数的测试与表征包括换能元电阻、换能元输出温度、不同材料样品临界熔断电流等。

首先利用自主研发的低电阻测试仪(测试精度 0.001 Ω)对 6 种不同材料薄膜结构换能元进行电阻测试,测试电阻与设计电阻对比见表 5。

表 5 换能元样品测试电阻与设计电阻对比

Tab. 5 Test resistance of energy conversion components samples compared with design resistance (Ω)

Sample	Ni	Cr	Pt	W	Cu	Al
Design resistance	4.36	8.28	6.80	3.53	1.09	1.73
Test resistance	23.1	374	12.6	221	23.2	3.4

由表 5 可知,所制备样品测试电阻与设计电阻偏差较大,分析认为是可能存在两方面原因:一方面是设计电阻仍然采用宏观经典电阻计算公式进行计算;另一方面是材料尺度达到亚微米尺度时会出现明显的尺度效应,特别是会带来电阻率的急剧增大,主要是由于薄膜厚度越小,其晶粒尺寸会越小,材料界面散射和晶界散射同时作用,晶界电子散射的增加,使得薄膜电阻率异常增大^[13],从而使得测试电阻与设计电阻产生较大偏差。针对不同材料表现出的尺度效应幅度不同,还有待进一步研究,本文不作深入探讨。

薄膜结构换能元的电热性能与其电阻大小直

接相关。本文首先依据测试电阻大小对不同材料薄膜结构换能元的恒流初始条件进行确定,其次采用美国 FILR 公司的 ThermoCAM SC3000 红外测试仪对换能元的不同恒流激励下的温度响应、桥区升温过程进行测试与表征,同时研究获得其桥区临界熔断电流。不同材料薄膜结构换能元样品不同系列恒流激励下红外温度结果如图 6 所示(金属 Cr 由于电源限制未获得相关数据),包括不同材料样品不同恒流下桥区温度以及临界熔断电流下桥区温度,需要指出的是本文所得到的桥区温度非桥区真温,而是在固定测试条件下获得的相对温度值,不同样品测试边界条件一致。以典型 Pt 材料样品为例,其在临界电流下温升特性及桥区熔断如图 7、图 8 所示。

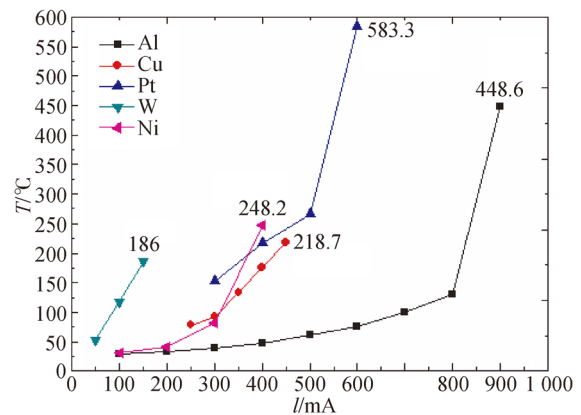


图 6 不同材料薄膜结构换能元红外测试结果

Fig. 6 Infrared test results of the thin film structure energy conversion components with different materials

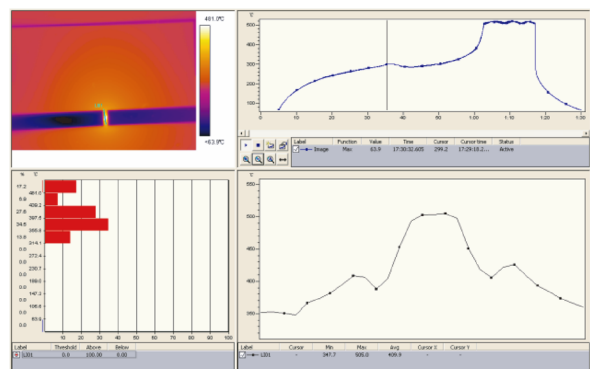


图 7 Pt 材料样品临界电流下温升特性(最高温度 583.3 °C)

Fig. 7 Temperature rise of Pt material under critical current (max 583.3 °C)



图 8 Pt 材料样品临界电流作用后桥区熔断情况

Fig. 8 Fracture of bridge area after the critical current of Pt material

由图 6 可知,本文设计制备的 6 种材料薄膜换能元中以 Pt 和 Al 材料换能元桥区温度较高,均超过了起爆药 LTNR 的爆发点($272\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{ s}$)^[14],且发火电流都小于 1 A,分别为 0.6 A 和 0.9 A。考虑到金属铝材料易被氧化及火工品使用材料相容性问题,因此,优选金属 Pt 材料作为本文设计的薄膜结构换能元的电阻层材料。

如前所述,薄膜结构换能元为平面层状结构,其基底材料对换能元作用性能也有重要影响,特别是热积累与传导过程影响显著。基于此本文采用不同基底材料,进行了采用不同基底层 Pt 材料薄膜结构换能元的样品制备,测试获得的恒流和电容放电条件下换能元作用性能数据见表 6。

表 6 不同基底材料换能元的作用性能对比

Tab. 6 Ignition performance of energy conversion components in different substrate

Substrate	Test resistance/ Ω	Constant current test	Capacitance test
		Ignition current/mA	Ignition voltage/V
Si	12.3	600	25/33 μF
Pyrex7740	11.8	150	5/33 μF

参考文献:

- [1] 褚恩义,贺爱锋,任西,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.
CHU E Y, HE A F, REN X, *et al.*. Development opportunities and technological approaches for system integration of pyrotechnics [J]. *Chinese Journal*

of Energetic Materials, 2015, 23(3):205-207. (in Chinese)

由表 6 可知,基底材料对换能元样品电阻特性的影响并不明显,但是对其发火性能的影响较为显著。无论是恒流条件还是电容放电条件,以 7740 玻璃为基底样品的发火能量均较低。结合基底材料性能参数数据可知,硅材料的导热率(100 W/mK)^[3,15]远大于 7740 玻璃(1.18 W/mK)^[16],分析认为基底材料的导热率对换能元能量转换过程影响较为显著,因此,本文研究确定以 7740 玻璃作为换能元的基底材料。

4 结 论

本文主要开展完成了适用于 MEMS 火工品的薄膜结构换能元的设计研究,通过不同电阻材料、不同基底材料“蛇”形结构换能元的设计、制备与性能分析,优选确定设计结构下了薄膜换能元的电阻和基底材料,获得的典型样品发火性能达 $5\text{ V}/33\text{ }\mu\text{F}$,满足 MEMS 火工品的低能化要求。通过研究,得出以下结论:

在同种“蛇”形薄膜桥结构下,由于电阻材料不同导致所制备的 6 种换能元电阻性能差异较大,直接影响了换能元的电热响应,其中,以 Pt 为电阻材料的换能元综合性能优异;不同基底材料,由于导热率存在较大差异,也会直接影响换能元的电热能量转换过程,对比研究了硅和 7740 玻璃,以 7740 玻璃为基底材料,换能元发火能量显著降低;与常规尺寸不同,MEMS 尺度下材料的尺度效应问题已不能忽视,将会直接影响火工品器件设计的准确性,以薄膜电阻率为例,在微纳米尺度下其电阻率与块状材料相比会发生急剧增加,为实现电阻的精确设计,必须考虑尺度效应问题,关于薄膜电阻尺度效应规律及机理研究将在后续工作中进一步深入探讨。

- [2] 孔俊峰,李兵. 新一代火工技术及其应用[J]. 国防技术基础,2010(7):40-43.
KONG J F, LI B. A new generation of initiation technique and application [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2010(7):40-43. (in Chinese)

- [3] ZHANG K L, CHOU S K, ANG S S. Fabrication, modeling and testing of a thin film Au/Timicroheater [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 45(6):580-588.
- [4] CHOPIN H. Low-cost MEMS initiators[C]. *Micro Assembly Technologies, NDIA 54th Annual Fuze Conference*, 2010.
- [5] NEHA MEHTA, TACOM-ARDEC, CHEMICAL ENGINEER. Design and development of micro energetic initiators (MEI) [C]. *NDIA 47th Annual Fuze Conference*, 2003.
- [6] 解瑞珍,薛艳,任小明,等. 桥区参数对 Ni-Cr 薄膜换能元发火性能的影响[J]. *火工品*, 2012(1):18-20.
XIE R ZH, XUE Y, REN X M, *et al.*. Effect of bridge parameters on the firing sensitivity of Ni-Cr alloy thin film transducer elements [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(1):18-20. (in Chinese)
- [7] LEE J, KIM T. MEMS solid propellant thruster array with micro membrane igniter [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 190(2):52-60.
- [8] 郭振山,王世斌,李林安,等. 纳米尺度金属薄膜在拉伸状态下的稳定性[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2293-2299.
GUO ZH SH, WANG SH B, LI L A, *et al.*. Stability of nano-scale thin metal films under tension [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2293-2299.
- [9] 黄闯,陈迪,陈翔,等. 用于微机电系统的微型带阻滤波器[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1244-1250.
HUANG CH, CHEN D, CHEN X, *et al.*. Compact band reject filter for micro electromechanical systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1244-1250. (in Chinese)
- [10] 徐超,李兆泽,万红,等. MEMS 固体微推进器中 Cr 薄膜点火电阻的研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5):1411-1414.
- XU CH, LI ZH Z, WAN H, *et al.*. Research on the Cr membrane igniting resistance in MEMS solid propellant micro-thruster[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006: 1411-1414. (in Chinese)
- [11] 张高飞,尤政,胡松启,等. 基于 MEMS 的固体推进器阵列[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(11):1489-1492.
ZHANG G F, YOU ZH, HU S Q, *et al.*. MEMS-based propulsion arrays with solid propellant [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(11):1489-1492. (in Chinese)
- [12] LEE J, KIM K, KWON S. Design, fabrication, and testing of MEMS solid propellant thruster array chip on glass wafer[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2010, 157(1):126-134.
- [13] 唐武,邓龙江,徐可为,等. 金属薄膜电阻率与表面粗糙度、残余应力的关系[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(4):617-620.
TANG W, DENG L J, XU K W, *et al.*. Relationship between resistivity of metallic film and its surface roughness, residual stress [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(4):617-620. (in Chinese)
- [14] 楚士晋. 炸药热分析[M]. 北京:科学出版社,1994.
CHU SH J. *Thermal Analysis of Explosive* [M]. Beijing: Science Press,1994. (in Chinese)
- [15] ROSSI C, ESTÉVE D, MINGUÉS C. Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1999, 74(1-3):211-215.
- [16] 张彬,褚思义,任炜,等. MEMS 火工品换能元的研究进展[J]. *含能材料*, 2017, 25(5):428-436.
ZHANG B, CHU E Y, REN W, *et al.*. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(5):428-436. (in Chinese)

作者简介:



任 炜(1982—),男,陕西西安人,高级工程师,2008年于兵器213所获得硕士学位,主要从事高新火工品技术的研究。E-mail:rw0192@163.com