

文章编号: 1006-9941(2012)02-0234-06

## MEMS 用含能薄膜研究现状及进展

王述剑<sup>1</sup>, 彭泓铮<sup>2</sup>, 张文超<sup>2</sup>, 马立远<sup>2</sup>

(1. 空军驻西南地区军事代表室, 重庆 400021; 2. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 在综合分析国内外含能薄膜相关文献的基础上, 认为金属复合含能薄膜桥、含能半导体桥及纳米多孔硅/氧化剂复合薄膜制作工艺与微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)器件制备技术具有良好的兼容性, 在此基础上阐述了上述三种薄膜材料的制备方法及其输出特性, 认为 MEMS 火工装置为火工技术的发展提供了一个重要的研究方向。

**关键词:** 材料科学; 含能材料; 微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS); 火工品

**中图分类号:** TJ55

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.021

### 1 引言

近年来, 随着科学技术的发展, 出现了微型航天器、微型卫星、弹道修正弹药、微型弹药等新一代信息化武器装备, 这些信息化武器装备姿态控制、点火分离、弹道修正以及安全保险等均离不开火工品, 并对其提出了点火可靠性高、作用时间短、集成化程度高、体积小、智能化<sup>[1-2]</sup>等高要求。由于微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术具有集成化、微型化、数字化、智能化等特点, 如将微机电系统技术与火工品结合, 将有助于满足信息化武器装备对火工技术提出的上述要求, 因此 MEMS 火工技术概念<sup>[3]</sup>也应运而生。

MEMS 火工技术是利用微机电系统制造技术将微电子系统、机械系统及含能材料集成, 使其有功能化的 MEMS 火工器件<sup>[3]</sup>。由于 MEMS 器件较小, 大多数科研工作者考虑将含能材料制备成薄膜的形式将其集成到 MEMS 器件中, 然而由于含能材料在高温下的热不稳定性, 因此存在着含能薄膜的制备工艺与 MEMS 制造技术兼容性的问题<sup>[4]</sup>。目前能够运用于 MEMS 的含能薄膜主要包括金属复合含能薄膜桥、含能半导体桥以及纳米多孔硅/氧化剂薄膜。本研究将从上述三个方面对 MEMS 用含能薄膜的研究现状进行分析和讨论。

### 2 MEMS 用含能薄膜的研究进展

#### 2.1 金属复合含能薄膜桥

金属复合含能薄膜桥是面对日益复杂的电磁环境并随着薄膜技术发展而出现的一类新型火工元件, 该含能薄膜桥在外界电能的刺激作用下, 不但能够发生电热效应, 并且在电热效应作用下, 桥膜上的物质发生化学反应或金属晶格能发生变化, 释放出能量。由于能够把该类薄膜桥上的含能材料控制在纳米级范围内, 因此该薄膜桥具有较短的点火反应时间和较高的能量输出强度。与此同时, 由于其使用微电子制造工艺, 能与 MEMS 制造技术有良好的兼容性。正是由于上述优点, 近年来众多研究者对 Al/金属、Al/金属氧化物复合含能薄膜进行了较为广泛的研究。

在 Al/金属复合含能薄膜研究方面, 由于 Al/Ni 金属复合含能薄膜具有燃烧和爆炸性能, 能够发生自蔓延反应, 同时又具有优良的导电、导热性能, 且其形成的金属间化合物具有较高的熔点、较低的密度和抗氧化等特性, 因此该材料有可能成为一类新型的含能桥膜材料, 受到了国外研究人员的重视。1999 年 Gavens<sup>[5]</sup>通过真空磁控溅射的方法制备出了厚度为 11  $\mu\text{m}$  的 Al/Ni 纳米薄膜 (Al/Ni 交替沉积), 每层厚度约在 12.5 ~ 200 nm 之间, 作者测量了其反应速率和放出的热量, 200 nm 厚双分子层的燃烧速率为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Anand<sup>[6]</sup>, Baerjee<sup>[7]</sup>, Ng<sup>[8]</sup>, Zalar<sup>[9]</sup> 等人通过制备符合化学计量比的合金靶材, 采用溅射镀膜的方法制备 Al/Ni 合金薄膜。Christopher J Morris 等人<sup>[10]</sup>研究了 Al/

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50806033)

作者简介: 王述剑(1977-), 男, 工程师, 主要从事火工品与火药质量管理。e-mail: wangshujian2000@163.com

通讯联系人: 张文超(1977-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事先进火工品、微纳含能材料等研究。e-mail: zhangwenchao303@yahoo.com.cn

Ni 纳米含能薄膜材料亚稳态金属反应,发现薄膜在高压强大电流作用下 100 ns 内将电能转化为速度为  $2 \sim 6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  飞片的动能,并且作者对反应后附着在玻璃板上的飞片进行了观察,认为该类含能薄膜材料具有较高的能量输出强度,能有效地使下一火工元件作用。

文献[11]认为微/纳米金属薄膜材料反应速率极高,特别是涉及到 Al 的铝热反应,例如  $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  反应速率达到了  $900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因此国外学者对 Al/金属氧化物复合含能薄膜进行了探索和研究。Blobaum 等<sup>[12]</sup>通过磁控溅射的方法将 Al/CuO 沉积到硅基底上形成多层纳米薄膜,为防止不同材料内部扩散,硅片在整个工艺过程中处于冷却状态,电镜照片见图 1,所形成的纳米薄膜反应生成热为  $(3.9 \pm 0.9) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。Kaili Zhang<sup>[13]</sup>则在上述研究的基础上对 Al/CuO 含能金属薄膜进行了深入研究,作者使用标准的 MEMS 制造工艺将 CuO 制备成纳米线,随后将 Al 沉积上去,形成 Al/CuO 纳米线含能薄膜,如图 2 所示。另外研究人员将 Al/CuO 含能材料集成到 Au/Pt/Cr 微加热装置上,形成“微/纳点火器”<sup>[14-15]</sup>,该点火器燃烧时伴随有强烈的亮光,表明该类含能薄膜材料燃烧时温度较高,能够有效地点燃或起爆下一级器件,如图 3 所示。Kaili Zhang<sup>[16]</sup>对 Al/NiO 的复合含能薄膜也进行了研究,他们通过热蒸发氧化硅基板的方法使得 Ni 薄膜形成二维的 NiO 纳米蜂窝状材料,然后通过加热 Al 蒸发,使得 Al 进入蜂窝状的 NiO 形成纳米级 Al/NiO 复合含能纳米薄膜,如图 4 所示。作者认为该类含能材料具有较低的点火温度,以及与 MEMS 技术有良好的兼容性。

从国外的研究现状可以发现,由于金属复合薄膜桥是一种亚稳态分子间化合物,其在外界能量刺激作用下发生分子与分子间化学作用,并可以通过控制工艺条件将 Al 与其它金属或金属氧化物控制在纳米级别内,从而使其具有较高的能量转化效率和较高的能量输出。

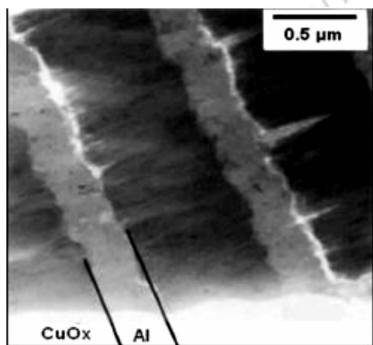
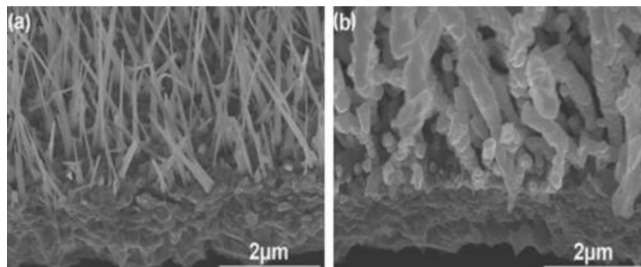


图 1 Al/CuO<sub>x</sub> 多层纳米薄膜 TEM 图<sup>[12]</sup>  
Fig.1 TEM image of Al/CuO<sub>x</sub> multilayer nano film



a. before Cu deposited b. after Cu deposited

图 2 Al/CuO 含能薄膜横截面 SEM 图<sup>[13]</sup>  
Fig.2 Cross-SEM images of Al/CuO film

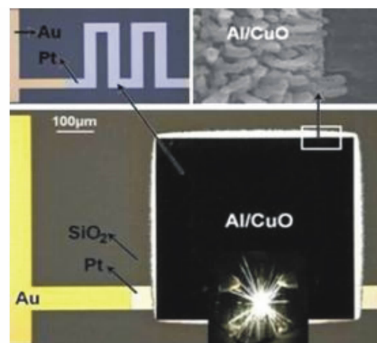
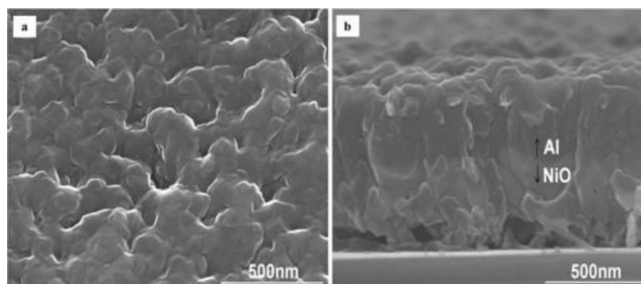


图 3 Al/CuO 微/纳点火器<sup>[14-15]</sup>

Fig.3 Al/CuO nano energetic materials based on micro/nano initiator



a. film surface b. a cross-sectional view

图 4 Al/NiO 含能薄膜 SEM 图<sup>[16]</sup>

Fig.4 SEM images of Al/NiO energetic film

北京理工大学、南京理工大学等几家单位在此方面也进行了探索和研究。北京理工大学王广海等人<sup>[17]</sup>利用磁控溅射法制备了一个中间带有 V 字形缺口的金属薄膜桥,进行了安全电流、抗静电实验,并通过红外热成像技术对桥区的温度分布进行了测量,结果表明金属薄膜桥有良好的抗静电性能、点火性能和机械性能,缺口处电流密度最高,热量最为集中。为了提高金属薄膜桥的点火能力及可靠性,王丽玲<sup>[18]</sup>利用磁控溅射法交替沉积制备出了硼和钛多层含能薄膜,单层厚度分别为 230 nm 和 250 nm,通过高速记录仪

记录了薄膜桥的点火过程,其火花溅射距离可达到30 mm左右。胡艳<sup>[19]</sup>、杨洋<sup>[20]</sup>等人则对 Al/CuO 进行了研究,发现所制备的复合含能薄膜具有明显的分层结构,Al 膜和 CuO 膜由均匀的纳米晶粒组成,薄膜桥通电后 Al 与 CuO 之间发生了氧化还原反应,与 Al 膜相比,其电流脉冲持续时间增长。朱朋等人<sup>[21]</sup>通过磁控溅射的方法制备 Al/CuO 复合薄膜,并对其电爆过程进行了测试研究,认为铝-氧化铜复合薄膜在一定条件下可以发生氧化还原反应,其生成热接近于其标准状态下生成热 ( $-1203.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),并从理论上推导出 Al/CuO 的化学反应分两步进行。

由此可见,国内外均对金属薄膜桥的制作工艺、性能测试等方面进行了探索和研究。由于金属复合含能薄膜桥所采用的制作工艺(例如溅射、气相沉积等)与 MEMS 器件的制作工艺相类似,因此使得金属薄膜桥能够集成到 MEMS 器件中,形成 MEMS 点火器件。目前所制作的薄膜桥大多是 Al/金属、Al/金属氧化物复合薄膜,使得薄膜桥在外界能量(例如电流)刺激作用下,存在着 Al 与金属或金属氧化物的化学反应,并且可以通过控制制作工艺条件将金属控制在纳米级内,因此金属薄膜桥具有高能量输出强度及较短的点火延迟时间。如将其与 MEMS 器件集成,将使得 MEMS 点火器件具有体积小、点火可靠性高、安全性高等优点,能够运用于微型航天器、灵巧弹药、微型卫星等,因此金属薄膜桥是非常具有潜力的点火器件。然而从国内外关于该方面研究对比来看,国外已经开始器件化并对 Al 与其他金属或金属氧化物进行了研究,因此国内在此方面还需要进一步努力。

## 2.2 含能半导体桥

半导体桥<sup>[22]</sup>(semiconductor bridge, SCB)是指利用微电子技术制造的,用半导体膜(或金属-半导体复合膜)做的发火元件,其具有体积小、发火能量低、安全性好、作用时间短等优点。正是由于其采用微电子制造工艺,SCB 与 MEMS 器件制造工艺具有很好的兼容性。SCB 诞生于 1968 年,真正受到人们重视是 20 世纪 80 年代中期,美国山迪亚实验室对其进行了充分的研究和完善,于 1987 年获得了专利<sup>[23-24]</sup>。从半导体桥 40 多年的发展历程来看,其主要经历了多晶硅半导体桥、单层金属及多层金属半导体复合桥以及反应式半导体桥,但是能作为含能薄膜的半导体桥只有反应式半导体桥。反应式半导体桥增加了可反应的化学物质,使得该桥具有较强的能量输出,点火可靠性大大提高,是 MEMS 用含能薄膜的理想选择之一。

反应式半导体桥作为半导体桥技术的最新进展,其由 Roland<sup>[25]</sup>于 2004 年发明并申请专利。该桥采用微电子制作工艺在金属半导体复合桥上沉积 Zr、Hf、Al 和 CuO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO<sub>2</sub> 或 B-Ti、Zr-Ti 等复合膜,通过复合膜的反应热或晶格热来提高半导体桥的点火能力,其结构如图 5 所示。由于半导体桥增加了可反应的物质,靠金属及氧化物之间铝热反应或晶格热放出大量的热和火花,使得该桥点火可靠性大大增加。

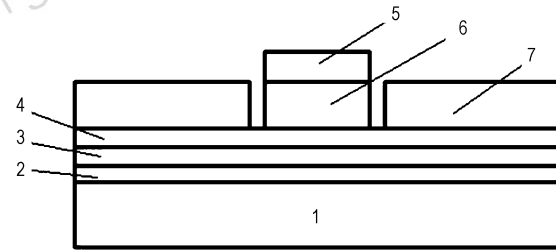


图 5 反应式半导体桥结构示意图<sup>[25]</sup>

1—硅, 2—二氧化硅, 3—多晶硅, 4—金属桥膜, 5—氧化铜/氧化铁等, 6—锆/铪等, 7—电极焊盘

Fig. 5 Configuration of SCB with chemical reaction (energetic SCB)

1—Si, 2—silicon dioxide, 3—polycrystalline silicon, 4—thin film of metal, 5—copper oxide/iron oxide etc, 6—materials of hafnium/zirconium etc, 7—electrode pad

Winfried Bemhand<sup>[26]</sup>等人在上述基础上用能与活性金属反应的聚合物(含氟聚合物、含氯聚合物及含氧)代替金属氧化物层,其发火能量仅为上述含能半导体桥的 1/3,而点火可靠性却大大提高。含能半导体桥降低了发火能量且具有较高的不发火裕度,增强了其安全性。除此之外,半导体桥使用了硅这种半导体行业使用最多的原材料,可利用微电子行业的制造、封装等自动化生产工艺<sup>[27]</sup>,使得其大规模制造成为可能。

国内目前关于半导体桥的制备主要集中在多晶硅半导体桥,其中南京理工大学、北京理工大学、电子科技大学及中国工程物理研究院等几家单位通过制备工艺、技术参数等因素对该类半导体桥进行了比较全面的研究,但对于本文所提到的性能优越的含能半导体桥(反应式半导体桥)设计、制备等方面的研究国内尚未见公开报道。关于反应式半导体桥性能测试、反应机理及其应用方面的研究国内外鲜有报道,特别是对于含能半导体桥的反应点火作用机理的研究,其是否与目前的半导体桥(多晶硅半导体桥及金属-复合半导体桥)的点火作用机理一致,还需进一步探索和研究。

### 2.3 纳米多孔硅/氧化剂复合含能薄膜

多孔硅 (porous Silicon, PSi) 作为一种多孔物质<sup>[28]</sup>, 其具有海绵状疏松的结构和微纳米级的通道, 因此具有较强的吸附作用。1992 年美国学者 A. J. Bard<sup>[29]</sup> 意外地将浓硝酸滴加到多孔硅表面, 发生了剧烈的爆炸反应, 首次报道了多孔硅/氧化剂复合含能材料的爆炸性能。2001 年德国 Kovalev<sup>[30]</sup> 发现多孔硅在低温条件下能够发生爆炸, 2002 年美国 Sailor 将氧化剂硝酸钆滴加到多孔硅中<sup>[31]</sup>, 发现这种复合含能材料在室温下即能发生爆炸。近几年来国外 Kovalev<sup>[30]</sup>、Clement<sup>[32]</sup>、Monuko<sup>[33]</sup> 等人通过电化学腐蚀的方法来制备多孔硅材料, 并对多孔硅填充氧化剂爆炸反应进行了深入研究, 认为多孔硅是一种活性极高的材料, 其基于硅氧放热反应产生的能量的潜力大大高于普通的碳基炸药, 与此同时多孔硅制备所使用的工艺与 MEMS 微电子制造工艺具有很好的兼容性, 并且硅是半导体工业中使用最多的原材料之一, 这些特点使得大规模成批次制备 MEMS 含能芯片成为一种可能, 正是这些优点使得众多含能材料学者对多孔硅产生了浓厚的兴趣, 并对其进行了探索研究。

2007 年 Monuko<sup>[34]</sup> 以 HF/无水乙醇溶液作为腐蚀液, 使用电化学方法, 通过控制电流密度和腐蚀时间等因素来控制其膜厚和孔隙率, 将硫、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $NaClO_4$  作为氧化剂分别溶于  $CS_2$ 、 $CH_3OH$  和  $CH_3CH_2OH$  填充到多孔硅中, 观察到其爆炸现象, 并认为该纳米爆炸装置具有非常广泛的应用前景, 实验结果如图 6 所示; 而且, Monuko 从三维模型探讨了多孔硅的比表面积与孔径大小的关系, 并通过实验方法进行了验证<sup>[35]</sup>。2008 年 Monuko 在上述研究基础之上进行了深入的研究, 发现对于多孔硅/氧化剂复合薄膜在外界刺激作用下释放能量时存在着一个最佳孔径, 并以多孔硅/ $Gd(NO_3)_3$  为例, 计算出其最佳孔径为 3.4 nm<sup>[36]</sup>。

Wayne Churaman<sup>[37]</sup> 则对多孔硅爆炸现象的化学过程进行了研究, 发现多孔硅/氧化剂爆炸前以 Si—H 键存在, 爆炸时出现了 O—H 键和 Si—O 键, 认为其爆炸过程中存在一个反应链:  $Si_nH_{2n+2} + O = SiH_3 + OH$ , 并提出了 O 和 OH 基生成的一些可能途径, 通过 FLIR 测量出了其爆炸时所产生的温度, 如图 7 所示。2010 年 Wayne Churaman<sup>[38]</sup> 利用标准的 MEMS 制作工艺将多孔硅/氧化剂复合含能薄膜材料集成到 MEMS 加速开关中, 表明了多孔硅/氧化剂复合含能材料与 MEMS 工艺良好的兼容性, 并使得该复合含能材

料与 MEMS 器件集成形成含能芯片成为可能<sup>[39]</sup>。台湾学者 Liu Liang-chun<sup>[40]</sup> 在 2010 年提出了微纳米多孔硅的热传导模型, 该模型考虑了孔隙率、孔径大小、膜厚以及孔的形状, 认为该模型能够较好的预测多孔硅所产生的热量和温度。

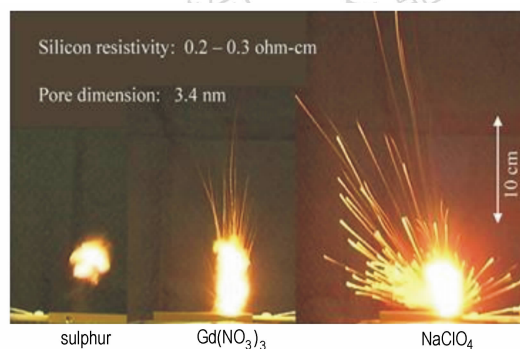


图 6 多孔硅填充不同氧化剂爆炸的火焰图<sup>[36]</sup>

Fig. 6 Optical emissions from different oxidant nano-explosions

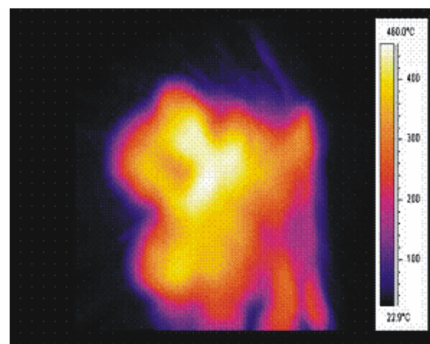


图 7 多孔硅/氧化剂爆炸时 FLIR 红外测温图<sup>[37]</sup>

Fig. 7 FLIR images measuring temperature during explosion of porous silicon/oxidant

陕西应用物理化学研究所、南京理工大学、中国工程物理研究院及重庆大学对多孔硅含能材料的制备和应用进行了研究。陕西应用物理化学研究所的薛艳<sup>[41-42]</sup> 利用电化学腐蚀的方法制备出了多孔硅, 以  $NaClO_4$  为氧化剂, 填充到多孔硅中, 认为多孔硅空隙结构发达、吸附能力强, 从而有利于其原位装药使氧化剂富集。南京理工大学王守旭等人<sup>[43-44]</sup> 同样通过电化学腐蚀的方法制备多孔硅, 并将高氯酸钠及高氯酸铵填充到多孔硅中, 认为高氯酸铵具有更高反应热, 更适合制备多孔硅含能芯片。中国工程物理研究院郁卫飞<sup>[45]</sup>、重庆大学的黎学明<sup>[46-48]</sup> 等人对多孔硅的制备工艺、多孔硅/氧化剂爆炸特性以及爆炸过程化学键断裂进行了研究, 认为多孔硅比表面积越高, 与氧化剂接触越充分, 爆炸越猛烈<sup>[45-48]</sup>。

综上所述, 多孔硅是一种活性极高的材料, 且能与



氧化剂充分接触形成一个氧化还原体系,该体系是一种良好的复合含能材料并且具有较高的能量输出。与此同时多孔硅能够使用标准的 MEMS 制造工艺进行制备,从而使得含能材料与 MEMS 器件集成化成为一种可能,并有望应用于微纳含能芯片中。但从目前国内外公开报道的文献来看,多孔硅的 MEMS 器件化还需要进一步努力。

### 3 展望

现代科学技术的发展伴随着各个学科相互交叉和影响, MEMS 用含能薄膜即是一个典型的例子。本文从能与 MEMS 制作工艺兼容的角度,分别阐述了金属复合含能薄膜桥、含能半导体桥及纳米多孔硅/氧化剂复合薄膜国内外的研究现状及进展,对上述三种薄膜材料的制备方法和输出特性进行了较为详细地介绍。虽然这些含能薄膜材料的研究有些还处于性能探索的阶段,但已经表现出了一些优异的性能,今后若能对其进行深入研究并与 MEMS 器件集成化,形成 MEMS 火工装置,这将从根本上改变传统的设计思路,并赋予火工系统高可靠性、高安全性、数字化、智能化、集成化等特点。

#### 参考文献:

- [1] 薛艳,卢斌. MEMS 火工品及微能起爆器发展综述[C]//中国兵工学会火工烟火专业第十三届学术年会,昆明,2005,10.
- [2] 徐超,李兆洋,万红,等. MEMS 固体推进器中/Cr 薄膜点火电阻的研究[J]. 传感技术学报,2006,19(5): 1411-1415.  
XU Chao, LI Zhao-ze, WAN Hong, et al. Research on the Cr membrane igniting resistance in MEMS solid propellant micro-thruster[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1411-1415.
- [3] 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.
- [4] Carole Rossi, Kaili Zhang, Daniel Estève, et al. Nanoenergetic materials for MEMS: A review[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16(4): 919-927.
- [5] Gavens A J, Heerden D V, Mann A B, et al. Effect of intermixing on self-propagating exothermic reactions in Al/Ni nanolaminate foils[J]. *Journal of Applied Physical*, 2000, 87(3): 1255-1263.
- [6] Anand T J S, Ng H P, Ngan A H W, et al. Temperature-coefficient-of-resistance characteristics of sputter-deposited  $Ni_xAl_{1-x}$  thin films for  $0.5 < x < 1$ [J]. *Thin Solid Films*, 2003, 441: 298-306.
- [7] Baerjee R, Thompson G B, Anderson P M, et al. Sputter deposited nanocrystalline Ni-25Al alloy thin films and Ni/Ni<sub>3</sub>Al multilayers[J]. *Thin Solid Films*, 2003, 424(1): 93-98.
- [8] Ng H P, Ngan A H W. Metal-to-insulator transition in sputter deposited Ni/Al thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(5): 2609-2616.
- [9] Zalar A, Hofmann S, Kohl D, et al. Characterization of intermetallic phases and oxides formed in annealed Ni/Al multilayer structures[J]. *Thin Solid Films*, 1995, 270(1-2): 341-345.
- [10] Keith B, Michelle L, Alexander E, et al. Combustion wave speeds of nano composite Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: The effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle synthesis technique[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 140(4): 299-309.
- [11] Christopher J Morris, Brian Mary, Eugene Zakar, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2010, 71(2): 84-89.
- [12] Blobaum K J, Reiss M E, Lawrence J M P, et al. Deposition and characterization of a self-propagating CuO<sub>x</sub>/Al thermite reaction in a multilayer foil geometry[J]. *Applied Physics*, 2003, 94(5): 2915-2912.
- [13] Zhang Kaili, Rossi Carole, Rodriguez Ardila. Development of a nano-Al/CuO based energetic material on silicon substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91: 113117-1-113117-3.
- [14] Chou S K, Yang W M, Chua K J, et al. Development of micro power generators: A review[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(1): 1-16.
- [15] Zhang Kaili, Rossi C, Petrantonio Marine, et al. A nano initiator realized by integrating Al/CuO-based nanoenergetic materials with a Au/Pt/Cr microheater[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(4): 832-836.
- [16] Zhang Kaili, Rossi Carole, Alphonse Pierre, et al. Integrating Al with NiO nano honeycomb to realize an energetic material on silicon substrate[J]. *Applied Physics A*, 2009, 94(4): 957-962.
- [17] 王广海,李国新,阿苏那. 薄膜桥火工品的制备与性能研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 543-546.  
WANG Guang-hai, LI Guo-xin, A Su-na. Preparation and properties of thin film bridge EED[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 543-546.
- [18] 王丽玲,蒋小华,何碧,等. 多层含能薄膜的制备及性能表征[J]. 火工品, 2009(1): 9-11.  
WANG Li-ling, JIANG Xiao-hua, HE Bi, et al. Fabrication and performance characterization of multilayer energetic films[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2009(1): 9-11.
- [19] 胡艳,叶迎华,沈瑞琪,等. 铝-氧化铜可反应性桥膜的制备及表征[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 339-342.  
HU Yan, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, et al. Preparation and characterization of Al/CuO reactive bridge film[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(3): 339-342.
- [20] 杨洋. Al/CuO 多层含能桥膜的制备与电爆特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [21] 朱朋,沈瑞琪,叶迎华,等. 铝-氧化铜复合薄膜化学反应性能[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 427-430.  
ZHU Peng, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Chemical reaction property of Al/CuO multilayer films[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 427-430.
- [22] 祝逢春,徐振相,陈西武,等. 半导体桥火工品研究的新进展[J]. 兵工学报, 2003(1): 106-110.  
ZHU Feng-chun, XU Zhen-xiang, CHEN Xi-wu, et al. Progress on the semiconductor bridge initiator[J]. *Journal of China Ordnance*, 2003(1): 106-110.
- [23] Robert W Bickes Jr, Alfred C Schwarz. Semiconductor bridge (SCB) igniter: USP4708060[P], 1987.
- [24] Hollander Jr. Semiconductor explosive igniter: USP3366055[P], 1968.
- [25] Mueller-Fiedler, Roland, Winfried, et al. Bridge igniter: USP6810815B2[P], 2004.
- [26] Winfried Bernhard, Lutz Mueller, Ulrich Kunz. Bridge-type igniter ignition element: USP6986307B2[P], 2006.
- [27] 张文超,张伟,徐振相,等. 半导体桥的研究进展与发展趋势[J]. 爆破器材, 2009(4): 21-23.  
ZHANG Wen-chao, ZHANG Wei, XU Zhen-xiang, et al. Progress

- and development on semiconductor bridge initiator [J]. *Explosive Materials*, 2009(4): 21–23.
- [28] Uhlir A. Electrolytic shaping of germanium and silicon [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1956, 35: 333–347.
- [29] McCord P, Yau S L, Bard A J. Chemiluminescence of anodized and etched silicon: Evidence for a luminescent siloxene-like layer on porous silicon [J]. *Science*, 1992, 257(3): 68–69.
- [30] Kovalev D V. Strong explosive interaction of hydrogenated porous silicon with oxygen at cryogenic temperatures [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(6): 683011–683014.
- [31] Mikulec F V, Kirtland J D, Sailor M J. Explosive nano-crystalline porous silicon and its use in atomic emission spectroscopy [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(1): 38–41.
- [32] Clement D, Diener J, Künzner J, et al. Highly explosive nanosilicon-based composite materials [J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2005, 202(8): 1357–1364.
- [33] Plessis Monuko du. Investigating nanoporous silicon explosive devices [J]. *Physica Status Solidi (B)*, 2009, 6(7): 1763–1768.
- [34] Plessis Monuko du. Properties of porous silicon nano-explosive devices [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 135: 666–674.
- [35] Plessis Monuko du. Relationship between specific surface area and pore dimension of high porosity nanoporous silicon: Model and experiment [J]. *Physica Status Solidi (A) – Applications and Materials Science*, 2007, 204(7): 2319–2328.
- [36] Plessis Monuko du. Nanoporous silicon explosive devices [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2008, 147(2–3): 226–229.
- [37] Churaman Wayne, Currano Luke, Singh Anant Kumar, et al. Understanding the high energetic behavior of nano-energetic porous silicon [J]. *Chemical Physical Letters*, 2008, 464: 198–201.
- [38] Churaman W, Currano L, Becker C. Initiation and reaction tuning of nanoporous energetic silicon [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2010, 71(2): 69–74.
- [39] Currano Luke J, Churaman Wayne A. Energetic nanoporous silicon devices [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(4): 799–807.
- [40] Liu Liang-Chun, Huang Mei-Jiau. Thermal conductivity modeling of micro- and nanoporous silicon [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(9): 1547–1554.
- [41] 薛艳, 陆斌, 解瑞珍, 等. 纳米多孔硅含能芯片性能研究 [J]. *火工品*, 2008(6): 9–11.  
XU Yan, LU Bing, XIE Rui-zhen, et al. Study on the property of nano-porous silicon/oxidant systems [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2008(6): 9–11.
- [42] 薛艳, 卢斌, 任小明, 等. 纳米多孔硅含能材料性能研究 [J]. *含能材料*, 2010, 18(5): 523–526.  
XU Yan, LU Bing, REN Xiao-ming, et al. Properties of energetic materials based on nano-porous silicon [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 523–526.
- [43] 王守旭, 沈瑞琪, 叶迎华. 多孔硅含能芯片的制备工艺和性能研究 [J]. *含能材料*, 2010, 18(5): 527–531.  
WANG Shou-xu, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua. Preparation and properties of porous silicon energetic chips [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 527–531.
- [44] 王守旭. 多孔硅爆炸复合物发火性能的研究 [D]. 南京: 南京理工大学.
- [45] 郁卫飞, 黄辉, 聂福德, 等. 纳米多孔硅复合含能材料爆炸反应的实验和理论研究 [J]. *含能材料*, 2004(增刊): 476–482.  
YU Wei-fei, HUANG Hui, NIE Fu-de, et al. Experimental and theoretical investigation on explosion phenomena of nano structure porous silicon composite [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(Supplement): 476–482.
- [46] 黎学明, 胡欣, 陈建文. 多孔硅/高氯酸钠复合含能材料的合成与爆炸特性的研究 [J]. *含能材料*, 2008, 16(6): 727–730.  
LI Xue-ming, HU Xin, CHEN Jian-Wen. Study on synthesis and explosion properties of porous silicon /NaClO<sub>4</sub> composite [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 727–730.
- [47] 黎学明, 陈建文, 杨文静, 等. 多孔硅/硝酸钆复合材料制备与表征 [J]. *化学通报*, 2009(5): 470–473.  
LI Xue-ming, CHEN Jian-wen, YANG Wen-jing, et al. Preparation and characterization of porous silicon/gadolinium nitrate composite materials [J]. *Chemistry Online*, 2009(5): 470–473.
- [48] 黎学明, 李春梅, 杨文静, 等. 热氧化多孔硅制备及其干涉特性研究 [J]. *功能材料*, 2009, 40(2): 256–259.  
LI Xue-ming, LI Chun-mei, YANG Wen-jing, et al. Study on preparation process and interference characteristics of thermal oxidized porous silicon [J]. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(2): 256–259.

## Review on Energetic Thin Films for MEMS

WANG Shu-jian<sup>1</sup>, PENG Hong-zheng<sup>2</sup>, ZHANG Wen-chao<sup>2</sup>, MA Li-yuan<sup>2</sup>

(1. Air Force Military Representative Office in Southwest Area, Chongqing 400021, China; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on the comprehensive analysis of literatures about energetic thin films, it is concluded that the technology and process of preparation for metal-composite energetic film, energetic semiconductor bridge (SCB) and nano-porous silicon/oxidant composite films are compatible with one of preparation on the micro-electro-mechanical systems (MEMS) devices. In addition, through representation about the methods of fabrication and energy output characteristic on three kinds of energetic thin films mentioned above, it is considered that initiating explosive device for MEMS can unfold a critical way for development of technology on initiators and pyrotechnics.

**Key words:** materials science; energetic materials; micro-electro-mechanical system (MEMS); initiating explosive device

**CLC number:** Tj55

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.021