

文章编号: 1006-9941(2015)03-0265-05

# (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 薄膜点火桥的制备及点火性能

蔡贤耀, 蒋洪川, 闫裔超, 张宇新, 邓新武, 张万里

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要:** 利用磁控溅射与微细加工技术, 将 B/Ti 多层膜沉积在 TaN 膜桥制备了 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 薄膜点火桥(膜桥), 其中 TaN 膜桥的尺寸为 80 μm×40 μm×2 μm, B/Ti 多层膜尺寸为 4 mm×4 mm, 层数为 40 层, 第一层 B 厚度 400 nm, 其后每层 B 或 Ti 厚度为 200 nm, 总厚度约 8 μm。用电压 40 V、电容 47 μF 的钽电容对样品进行发火性能测试。结果表明: TaN 膜桥的点火延迟时间为 85 μs、点火输入能量 15 mJ、爆炸温度 2500~3500 K、火焰持续时间 0.15 ms 左右、炸药持续高度 5 mm 左右, 而 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥的点火延迟时间为 37 μs、点火输入能量 6 mJ、爆炸温度 4000~8500 K、火焰持续时间大于 0.25 ms、火焰持续高度 10 mm 以上。在点火桥上沉积 B/Ti 多层膜可降低点火延迟时间和点火输入能量, 有效提升火工品的点火性能。

**关键词:** 磁控溅射; (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥; TaN 膜桥; B/Ti 多层膜

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.012

## 1 引言

电火工品是一种由较小电能刺激后产生燃烧或爆炸, 用于引燃火药、引爆炸药、做机械功等预定功能的一次性使用的元件或装置的总称。传统的电火工品是利用金属桥丝通电后, 将电能转化为热能, 进一步点燃涂覆在电阻丝周围的起爆药剂, 如斯蒂芬酸铅点火药等, 达到点火的目的。这种方法需手工涂覆点火药剂, 难以批量化生产、不容易集成化生产、能量转化效率低, 安全性、可靠性、一致性低。采用沉积技术制备的膜桥(薄膜点火桥)具有作用时间短、适合集成化生产、体积小、安全性、可靠性、一致性高等优势<sup>[1]</sup>。为此, 国内外对薄膜点火桥的设计和制备进行了大量的研究工作<sup>[2-5]</sup>, 取得了较大的进展。但是这类薄膜点火桥仍需手工涂覆点火药剂, 存在点火输入能量高、能量转化效率低、起爆药剂与桥区难以紧密接触等问题。可反应多层膜(Reactive Multilayer Films, RMFs)是一种叠层式纳米含能薄膜材料, 它在热能或电能作用下可发生化学或合金化反应, 释放出大量的能量, 可制备成含能点火膜桥。国内外对 Ni/Al、Al/CuO、Al/

MoO<sub>3</sub>、Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B/Ti 等可反应含能多层膜桥的制备和性能进行了大量的研究<sup>[6-11]</sup>, 取得了一定的成果。若能将薄膜点火桥和可反应含能多层膜桥进行复合, 即在薄膜点火桥上再沉积可反应含能多层膜, 用可反应含能多层膜取代点火药剂, 实现电能材料和化学能材料的结合, 可有效提高点火桥的安全性、可靠性、一致性, 降低点火输入能量, 提高能量转换效率, 避免手工涂覆点火药的缺陷。Kaili Zhang 团队<sup>[12]</sup>在 Au 膜桥上制备了 CuO 纳米线后沉积一层 Al, 成功地利用 Au 膜桥引燃 CuO/Al 含能膜实现点火, 并且有效地提高了能量转换效率, 但在点火时间延迟, 爆炸温度等点火性能方面还有待进一步提升。

本研究将 B/Ti 可反应含能多层膜与 TaN 膜桥相结合, 实现化学能和电能的结合, 实验采用磁控溅射和湿法腐蚀工艺制备 TaN 膜桥, 再在 TaN 膜桥上沉积 B/Ti 多层膜, 并对样品的点火性能进行了测试分析。

## 2 点火桥的制备

(B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥的结构如图 1 所示。基片为氧化铝陶瓷片(99%), 尺寸为 10 mm×5 mm×0.5 mm, TaN 膜桥桥区尺寸为 80 μm×40 μm×2 μm, B/Ti 多层膜覆盖在 TaN 膜桥桥区之上, 其尺寸为 4 mm×4 mm, 每层厚 200 nm, 40 层, 共计 8 μm 厚。Cu 电极尺寸为 3 mm×4 mm×1.5 μm。

制备的简要流程图如图 2 所示。

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-05-05

基金项目: 国防预研基金资助(9140A12040412DZ02138)

作者简介: 蔡贤耀(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事火工品技术及含能材料研究。e-mail: xiaoxiandi86@gmail.com

通信联系人: 蒋洪川(1971-), 男, 教授, 主要从事电子薄膜材料与器件研究。e-mail: hcjiang@uestc.edu.cn

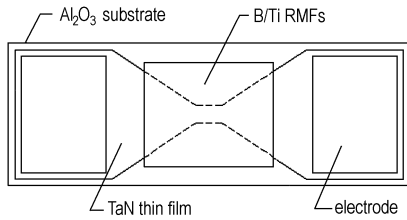


图1 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥结构

Fig.1 The structure of (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge

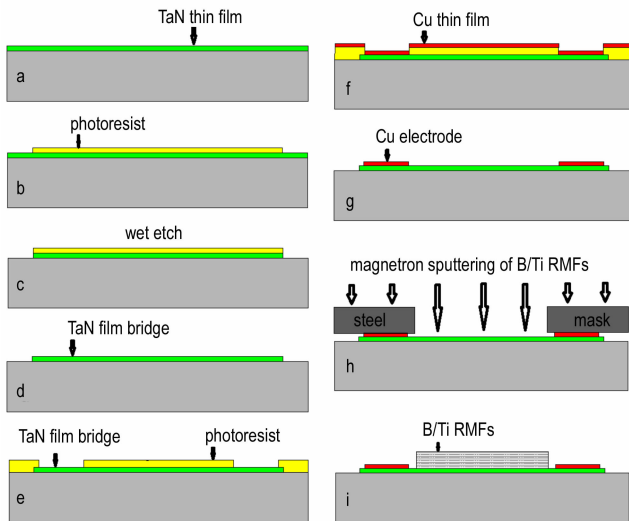


图2 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥制备流程图

Fig.2 Fabrication process of (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge

实验所用 Ta 靶、Cu 靶、B 靶和 Ti 靶均为纯度 99.999% 的单质靶材,磁控溅射时的背底真空均小于  $5 \times 10^{-4}$  Pa。首先,利用反应直流磁控溅射沉积约  $2 \mu\text{m}$  厚的 TaN 薄膜(图 2a),TaN 制备工艺为:溅射气压 0.33 Pa,基片温度  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,氮气流量为 0.3 sccm,氩气流量为 30 sccm,直流功率为 100 W,沉积时间 1 h。用微细加工技术中的湿法刻蚀工艺图形化 TaN 桥区。利用 URE-2000S/A 型双面对准接触式光刻机和光刻胶 PR1-9000A 对 TaN 薄膜进行光刻,得到厚度高达  $8 \mu\text{m}$  的光刻胶图形(图 2b)。将光刻后的样品置于由浓硝酸(质量分数 68%)和浓氢氟酸(质量分数 40%)以体积比 2:1 制备的腐蚀液中腐蚀 30 s 左右,迅速取出样品清洗,所得到图形化(图 2c,图 2d)的 TaN 薄膜桥区,照片如图 3 所示。采用微细加工工艺中的剥离法工艺制备约  $1.5 \mu\text{m}$  厚 Cu 电极(图 2e~图 2g)。制备完 Cu 电极后,用划片机将各个样品分割好。最后,用金属掩模法在 TaN 桥区上交叠沉积 B/Ti 多层膜(图 2h,图 2i),其中第一层为 B 层,厚

度为  $400 \text{ nm}$ ,其余每层厚度约为  $200 \text{ nm}$ ,共 40 层。制备好的样品实物照片如图 4 所示,电阻值约为  $2 \Omega$ 。

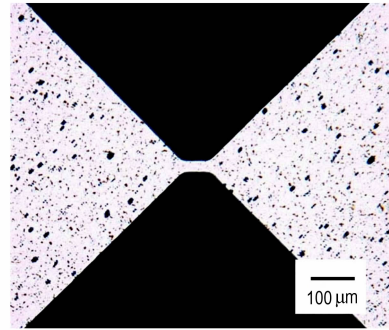


图3 完成刻蚀的 TaN 膜桥

Fig.3 TaN thin-film initiator bridge

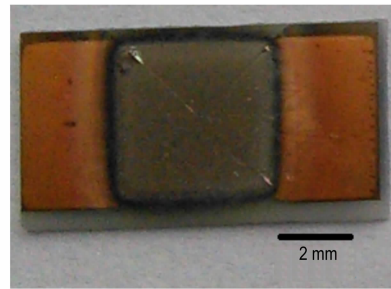


图4 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥样品实物图

Fig.4 Physical map of (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge

### 3 结果与讨论

图 5 为 B/Ti 多层膜的断面 SEM 图片。由图 5 可见,B/Ti 多层结构清晰,层与层间连接致密无缺陷。但也可以看出最初沉积的薄膜偏厚,反复沉积了 4、5 层后,厚度逐渐均匀,稳定在  $200 \text{ nm}$ 。在刚开始沉积时,基片的表面比较光滑,B、Ti 能够有序平整的吸附在基片表面,沉积速率比较快。随着 B、Ti 的逐层沉积,特别是 B 分子间容易发生团聚形成岛状生长,加大了薄膜表面的粗糙度。粗糙的薄膜表面结构松散,物理吸附系数下降,已沉积的薄膜容易被轰击向薄膜表面的高能粒子轰击回溅射气氛中去,不利于 B、Ti 的沉积,沉积了 4、5 层后,基片的粗糙度已经对沉积时的表面粗糙程度没有影响,薄膜表面的粗糙度趋于稳定,B、Ti 的沉积速率便变得稳定,各层薄膜厚度随之变得均匀。

点火测试系统示意图如图 6 所示。起爆装置采用  $47 \mu\text{F}$  的钽电容充  $40 \text{ V}$  放电来起爆样品,用采样频率最高  $400 \text{ MHz}$  的 LeCroy 型示波器配备电流和电压探

头实时记录点火时的电压、电流波形数据,通过光纤探头、光栅以及光电倍增管采集双光谱强度波形数据。同时,使用高速摄像机(HS4540MX12)对点火进行实时录制。示波器与摄像机的数据记录均用起爆装置的点火信号进行触发。

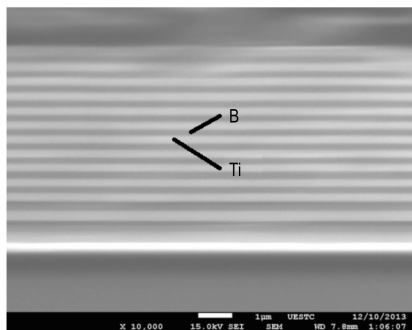


图5 B/Ti 多层膜的断面 SEM 图

Fig.5 SEM photo of cross-section of B/Ti multilayer film

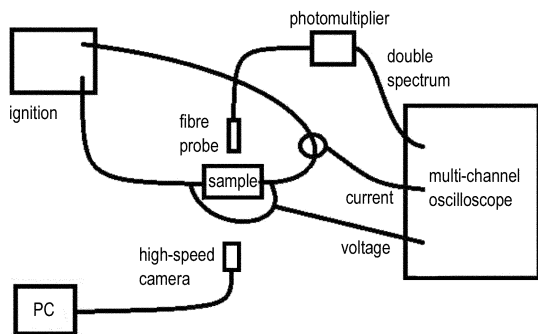


图6 点火测试系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of ignition testing system

图7为Ta<sub>n</sub>膜桥(第一行图像)与(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥(第二行图像)点火的高速(20000fps)摄像图像。由图7可以看出Ta<sub>n</sub>膜桥火焰高度约5mm,火焰持续时间约为0.15ms。而(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥的火焰长度是Ta<sub>n</sub>膜桥的两倍左右,达到了10mm以上,飞溅出来的高温物质则喷射长达30mm以上,火焰持续的时间大于0.25ms,也比Ta<sub>n</sub>膜桥至少要长0.1ms。可见,B/Ti多层膜明显提升了点火能力。

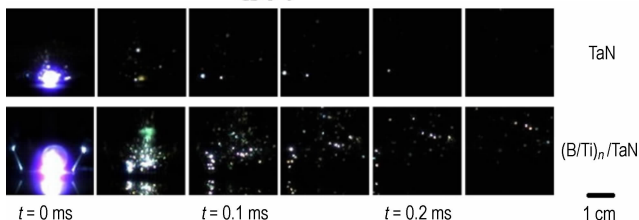


图7 点火过程的高速摄像图片

Fig.7 Ignition process by high-speed photography

图8和图9分别为Ta<sub>n</sub>膜桥与(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥点火电压和电流随时间变化曲线。从电压曲线峰值微区放大的小图可以看出,Ta<sub>n</sub>膜桥点火时电压达到峰值时间在1.8μs左右,(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥在2.2μs左右。由于Ta<sub>n</sub>膜桥表面直接接触空气,而(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥中Ta<sub>n</sub>膜桥与B/Ti多层膜无缝接触,当点火电能开始加载在膜桥上时,B/Ti多层膜吸收了更多的热量,降低了(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥的升温速率。当桥区开始形成等离子体,桥区电阻开始下降,此时电压达到峰值,升温速率的下降使(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥开始形成等离子体的时间推迟,从而使(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥电压峰值出现稍晚。随着Ta<sub>n</sub>桥区的升温,逐步形成高温等离子体,但桥区仍未立即完全熔断,点火回路还在继续加载电能。(B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥中的B/Ti多层膜在高温等离子体的作用下也开始进入化学反应阶段。Ta<sub>n</sub>膜桥在85μs时电流降为0A,而电压依然还有30V,由此可见,桥区在85μs时彻底熔断,剩余的电压表明在Ta<sub>n</sub>桥区熔断时,电容内所储存的电能并未完全释

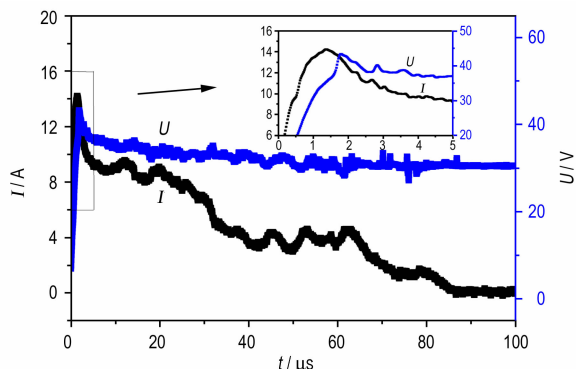


图8 Ta<sub>n</sub>膜桥点火电压和电流随时间的变化曲线

Fig.8 Ignition voltage and current history of Ta<sub>n</sub> thin-film initiator bridge

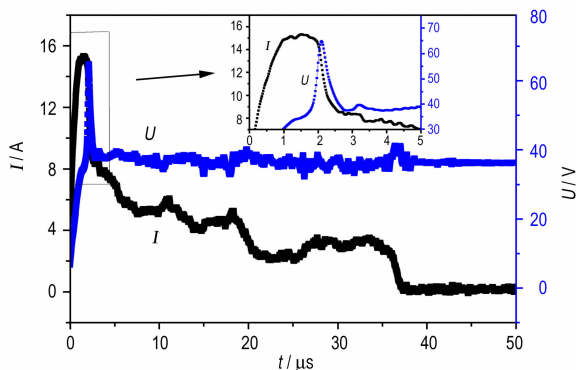


图9 (B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub>膜桥点火电压电流随时间变化曲线

Fig.9 Ignition voltage and current history of (B/Ti)<sub>n</sub>/Ta<sub>n</sub> thin-film initiator bridge

放。(B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥则在 37 μs 的时候完全熔断, 剩余电压还有 36 V, 高于 TaN 膜桥的剩余电压。由剩余电压可推断, (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥所需的点火能量比单独的 TaN 膜桥少。对点火时采集的电压电流随时间变化的数据进行积分, 可以得到 TaN 膜桥所需的点火能量为 15 mJ, (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥所需的点火能量为 6 mJ。以上测试数据说明, (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥对比 TaN 膜桥, 提高了点火能量释放速率, 减少点火时间延时大于 50%, 降低点火膜桥的点火输入能量大于 50%。

实验选择了 Cu 的两条特征谱线 521.84, 455.59 nm, 结合原子发射光谱双谱线法测温理论<sup>[7]</sup>, 可以推导得到温度测量参考公式(1):

$$T = \frac{3191}{1.88 - \ln \frac{I_1}{I_2}} \quad (1)$$

式中,  $T$  为温度, K;  $I_1/I_2$  表示由上述两条特征谱线( $I_1$ : 521.84 nm,  $I_2$ : 455.59 nm) 的相对强度比值。由式(1)可以看出: 这里只需测试两条谱线的相对强度比值, 无需准确的测定绝对强度, 省去复杂的强度定标过程, 减少实验环境对测试结果的干扰。实验通过光纤采集点火时的光谱数据, 使用光栅分离出 521.84, 455.59 nm 两条谱线, 使用同一光电转换器采集两条光谱强度数据, 最后通过数据线实时传输到示波器的两个独立通道中记录保存。这样采集的谱线强度数据虽然未能保证绝对强度准确, 但能保证  $I_1/I_2$  相对强度的准确。将示波器内记录的两条谱线的强度数据依照式(1)进行处理, 得到图 10 和图 11, 分别表示 TaN 膜桥与 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥点火时所产生的等离子体温度随时间变化曲线。由图 10 与图 11 可知: TaN 膜桥的温度为 2500 ~ 3500 K, 平均温度为 2500 K 左右。(B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥的温度为 4000 ~ 8500 K, 平均温度 4500 K 左右。(B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥点火所产生的等离子体温度比 TaN 膜桥高 2000 K 左右。比较两幅图还可以发现 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥的温度最高峰出现的比 TaN 膜桥的晚 7 μs 左右, 这是因为 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥产生火焰是分两步进行的。第一步是 TaN 桥区通电发热并产生冲击波, 通过单独的 TaN 膜桥的点火时间延迟较短以及点火火焰的火花四射可以看出冲击波能量脉冲较强。第二步是 TaN 桥区将能量以热量和冲击波的形式传递给 B/Ti 多层膜, 使其达到化合反应的条件, 并进一步触发化合反应释放出大量的热量。B 和 Ti 的化学反应如式(2)所示。B 与 Ti 化合反应

的释热速率相对 TaN 膜桥电致释热较慢, 所以 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥点火的温度峰值出现得比 TaN 膜桥迟。

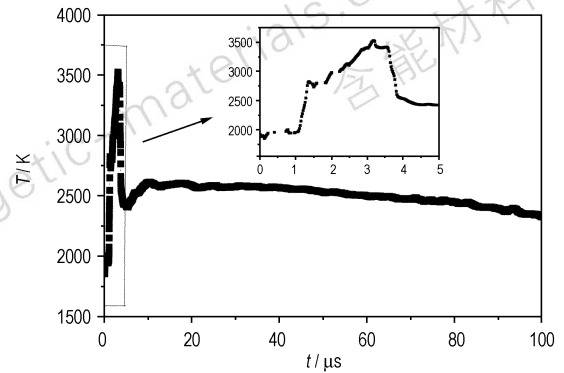
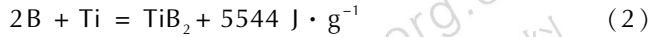


图 10 TaN 膜桥点火温度随时间变化曲线

Fig. 10 Ignition temperature history of TaN thin-film initiator bridge

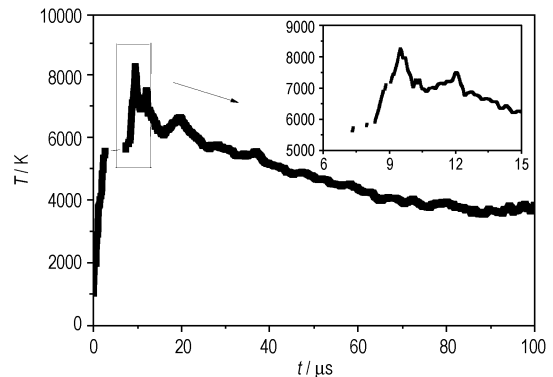


图 11 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥点火温度随时间变化曲线

Fig. 11 Ignition temperature history of (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge

## 4 结论

采用磁控溅射和微细加工技术制备了 (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥, 并进行点火测试。测试分析表明: 通过 (B/Ti) 多层膜与 TaN 膜桥复合, (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥对比于 TaN 膜桥, (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN 膜桥降低点火膜桥的点火输入能量大于 50%, 减少点火延时大于 50%, 提升点火时产生的等离子体温度 2000 K 以上, 喷射出大于 10 mm 长的火焰, 为 TaN 膜桥火焰长度的两倍, 并持续 0.25 ms, 比 TaN 膜桥多 0.1 ms, 能有效提高点火桥的点火能力, 制备方法适合集成化生产工艺, 是一种适用于电火工品的高可靠性、高安全性的新型点火技术。

**致谢:** 在实验的过程中得到了中国工程物理研究院化工材料研究所的蒋小华、王亮、覃文志老师的悉心指导。在后期测试中,得到了南京理工大学的沈瑞琪、吴立志老师和胡博同学的热情帮助,我们在此表示衷心感谢!

#### 参考文献:

- [1] 梅清和. 国外新一代火工技术及其应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2007, 15(2): 48-51.  
MEI Qing-he. A pyrotechnic technology of a new generation and its application abroad[J]. *Mine Warfare & Ship Self-defence*, 2007, 15(2): 48-51.
- [2] 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(05A): 1411-1414.  
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(05A): 1411-1414.
- [3] Benson D A, Larsen M E, Renlund A M, et al. Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosives[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(5): 1622-1632.
- [4] 胡建书, 焦清介. 恒流作用下 V 型半导体电热特性研究[J]. 煤矿爆破, 2004, 71(4): 4-5.  
HU Jian-shu, JIAO Qing-jie. A Study on the galvanothermy of V type semiconductor bridge under constant current[J]. *Coal Mine Blasting*, 2004, 71(4): 4-5.
- [5] Jongdae K, Kee-Soo N, Jungling K C. Plasma electron density generated by a semiconductor bridge as a function of input energy and land material[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 44(6): 1022-1026.
- [6] Gavens A J, Van Heerden D, Mann A B, et al. Effect of intermi-  
xing on self-propagating exothermic reactions in Al/Ni nanolaminate foils[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(3): 1255-1263.
- [7] 朱朋, 周翔, 沈瑞琪, 等. 介电式 Al/CuO 复合薄膜点火桥的爆炸性能[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 366-369.  
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, 19(4): 427-430.
- [8] 付帅, 朱朋, 叶迎华, 等. Al/MoO<sub>3</sub> 和 Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米含能薄膜制备与性能表征[J]. 功能材料, 2013, 44(15): 2213-2216.  
FU Shuai, ZHU Peng, YE Ying-hua, et al. Synthesis and characterization of Al/MoO<sub>3</sub> and Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-energetic films[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(15): 2213-2216.
- [9] 王成玲, 叶迎华, 沈瑞琪, 等. 图形反转剥离工艺用于复合含能点火桥膜的制备[J]. 火工品, 2012(4): 1-5.  
WANG Cheng-ling, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, et al. Image reversal lift-off process for fabrication of energetic multilayer ignition bridge films[J]. *Initiator & Pyrotechnics*, 2012(4): 1-5.
- [10] 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]. *Initiator & Pyrotechnics*, 2009(1): 9-11.
- [11] Tanaka S, Kondo K, Habu H, et al. Test of B/Ti multilayer reactive igniters for a micro solid rocket array thruster[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 144(2): 361-366.
- [12] Zhang K L, Rossi C, Marine P, et al. A nano initiator realized by integrating Al/CuO-based nanoenergetic materials with a Au/Pt/Cr microheater[J]. *Microelectromechanical Systems, Journal of Microelectromechanical System*, 2008, 17(4): 832-836.

## Fabrication and Performances of (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN Thin-film Initiator Bridge

CAI Xian-yao, JIANG Hong-chuan, YAN Yi-chao, ZHANG Yu-xin, DENG Xin-wu, ZHANG Wan-li

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** By using magnetron sputtering and micro-manufacturing technology, the (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge was fabricated, with the 40 layers B/Ti multi-layers (4 mm×4 mm) deposited on TaN thin-film 80 μm×40 μm×2 μm initiator bridge contained 40 layers of B and Ti, where the first layer was 40 nm thickness B, and others were 200 nm B or Ti. The ignition performances of the samples were tested by a 47 μF tantalum capacitor with voltage of 40 V. Results show that the ignition delay time, input ignition energy, explosion temperature, duration time and height of flame for TaN thin-film initiator bridge are 85 μs, 15 mJ, 2500-3500 K, 0.15 ms, 5 mm, while, for (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge, they are 37 μs, 6 mJ, 4000-8500 K, 0.25 ms, 10 mm, respectively. It is found that the introduction of B/Ti multi-layers can decrease the ignition delay time and input ignition energy, improve the ignition performances of TaN thin-film initiator bridge.

**Key words:** magnetron sputtering; (B/Ti)<sub>n</sub>/TaN thin-film initiator bridge; TaN thin-film initiator bridge; B/Ti multilayer films

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.012