

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.001

# 基于 Cu 阻挡层的 Al/CuO 含能半导体桥的电爆性能研究\*

史安然<sup>①②③</sup> 周宇轩<sup>①②③</sup> 沈云<sup>④</sup> 张伟<sup>①②③</sup> 叶迎华<sup>①②③</sup> 沈瑞琪<sup>①②③</sup>

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②微纳含能器件工业和信息化部重点实验室(江苏南京,210094)

③南京理工大学空间推进技术研究所(江苏南京,210094)

④江苏警官学院警察指挥与战术系(江苏南京,210031)

[摘 要] 界面层的反应性是纳米含能复合薄膜(RMFs)制备中的重要因素,直接影响纳米 RMFs 的反应性能。为了研究纳米 Al/CuO RMFs 在半导体桥上集成后的电爆性能,采用磁控溅射工艺制备了 Al/CuO 含能半导体桥(Al/CuO-ESCB)和 Al/Cu/CuO 含能半导体桥(Al/Cu/CuO-ESCB),研究了 Cu 层作为阻挡层对 Al/CuO-ESCB 电爆过程的影响。结果表明:增加 Cu 阻挡层可以缩短 ESCB 的临界激发时间,增加 ESCB 的燃烧时间。

[关键词] 纳米 Al/CuO RMFs;半导体桥;阻挡层;电爆特性

[分类号] TJ450.3

## Electric Explosion Performance of Al/CuO Energetic Semiconductor Bridge Based on Cu Barrier Layer

SHI Anran<sup>①②③</sup>, ZHOU Yuxuan<sup>①②③</sup>, SHEN Yun<sup>④</sup>, ZHANG Wei<sup>①②③</sup>, YE Yinghua<sup>①②③</sup>, SHEN Ruiqi<sup>①②③</sup>

① School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory of MIIT (Jiangsu Nanjing, 210094)

③ Institute of Space Propulsion, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

④ Police Command and Tactic Department, Jiangsu Police Institute (Jiangsu Nanjing, 210031)

[ABSTRACT] Reactivity of the interface layer is an important factor in the preparation of nano energetic composite films (RMFs). Specifically, it directly affects the reaction performance of RMFs. In order to study the electric explosion properties of Al/CuO RMFs integrated on semiconductor bridges, Al/CuO and Al/Cu/CuO energetic semiconductor bridge were fabricated by magnetron sputtering. The effect of Cu layer as the barrier layer on the electric explosion process of Al/CuO energetic semiconductor bridge was examined. Results show that the critical excitation time can be shortened and the combustion time of energetic semiconductor bridge can be increased by adding Cu barrier layer.

[KEYWORDS] nano Al/CuO RMFs; semiconductor bridge; barrier layer; electric explosion characteristic

## 引言

随着科学技术的不断发展,半导体桥(semiconductor bridges,SCB)火工品由于其优良的非线性换能性能在军事和民用方面得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。SCB 采

用电爆炸形式输出能量,具有功耗低、发火时间短、作用迅速、体积小、可靠性高、安全性高等优点<sup>[3-4]</sup>。然而随着微纳米火工器件的发展,半导体桥面临着小型化后点火能力不足的问题。将 Al/CuO<sup>[5-6]</sup>、Al/MoO<sub>3</sub><sup>[7-8]</sup> 和 Al/Ni<sup>[9-10]</sup> 等纳米含能复合薄膜(reactive multilayered films, RMFs)集成到半导体桥火工品上,

\* 收稿日期:2022-07-28

基金项目:国家自然科学基金(12074187);国防科技重点实验室基金(6142602200101)

第一作者:史安然(1992-),女,博士研究生,主要从事纳米结构含能材料及先进火工品技术研究。E-mail:arshi@njust.edu.cn

通信作者:沈瑞琪(1963-),男,教授,主要从事先进火工品技术及新型含能材料研究。E-mail:rqshen@njust.edu.cn

张伟(1986-),男,副研究员,主要从事先进火工品技术及先进推进技术研究。E-mail:wzhang@njust.edu.cn

制备得到的复合含能半导体桥 (energetic semiconductor bridges, ESCB) 能够极大地提高半导体桥的点火能力<sup>[11-12]</sup>。其中, Al/CuO RMFs 以 4.08 kJ/g 的高质量能量密度得到了较高关注<sup>[13]</sup>。但是在研究中发现, 总厚度相同的纳米 Al/CuO RMFs 的能量释放会随着界面层数量的增加而减少<sup>[14]</sup>。

2015 年, Marin 等<sup>[15]</sup>在 Al 层与 CuO 层中添加了一层 5 nm 的 Cu 层来提高纳米 Al/CuO RMFs 的反应性能, 增强了纳米 Al/CuO RMFs 的反应活性。杨腾龙等<sup>[16]</sup>为了提高 Ni-Cr 薄膜发火件的安全性和点火能力, 于 2019 年使用磁控溅射技术将 Al/CuO 含能薄膜与 Ni-Cr 薄膜发火件复合, 制备了一种新型的 Ni-Cr@Al/CuO 钝感含能元件。Shen 等<sup>[17]</sup>利用磁控溅射的方式将纳米 Al/CuO RMFs 集成到不同形态的 V 型镍铬桥 (nichrome bridges, NCBs) 上, 制备了 4 种 V 型角的 Al/CuO 含能镍铬桥 (energetic nichrome bridges, ENCBs) 点火器; 系统地介绍了电容放电条件下 ENCBs 起爆器的电爆特性以及恒流条件下的点火过程。

界面层的数量是纳米 RMFs 制备过程中影响能量走向的重要参数, 直接影响纳米 RMFs 的化学反应活性<sup>[14, 18]</sup>。但至今未有关于界面层反应性对于 ESCB 电爆特性影响的公开报道。本文中, 旨在研究 RMFs 添加阻挡层前、后对于 ESCB 电爆特性的影响。为了不引入其他元素, 选取 Cu 层作为纳米 Al/CuO RMFs 的阻挡层, 采用磁控溅射技术制备了 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB。通过对比 SCB、Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的临界激发时间和燃烧时间等参数, 探究界面层对于 ESCB 电爆性能的影响, 以期优化 ESCB 的电爆性能。

## 1 试验

### 1.1 试剂与仪器

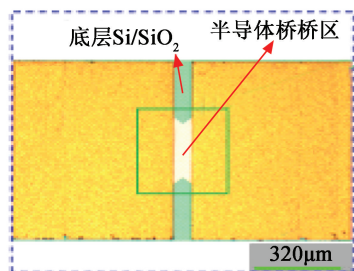
试剂: Al 靶材 (直径 76 mm, 厚 5 mm, 纯度为 99.99%)、Cu 靶材 (直径 76 mm, 厚 6 mm, 纯度为 99.99%)、CuO 靶材 (直径 76 mm, 厚 4 mm, 纯度为 99.99%), 中诺新材料科技有限公司; 无水乙醇、丙酮, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

仪器: PH-LW52-BHP 型智能激光冷水机, 深圳东露阳实业有限公司; MS550 型多功能通用镀膜机, 南京理工大学; KD-0510 型直流电源和 AG-1305 型射频电源, 中山市凯美电子有限公司。

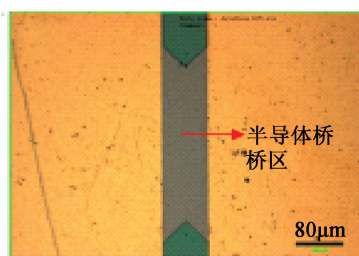
### 1.2 样品制备

桥区为双 V 型半导体桥, V 型夹角为 90°, 桥区

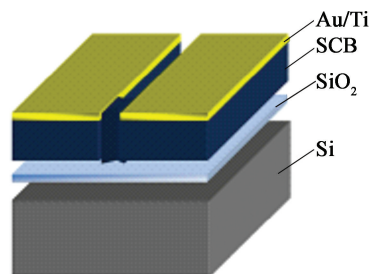
尺寸设计为 380  $\mu\text{m}$  (宽度)  $\times$  80  $\mu\text{m}$  (长度)  $\times$  2.5  $\mu\text{m}$  (厚度), 电阻为  $(1.3 \pm 0.1) \Omega$ , 由夹在硅基片与电极之间的重掺杂多晶硅构成, 电极焊盘采用 Au/Ti。主要结构如图 1 所示。



(a) 半导体桥芯片的显微镜图片



(b) 半导体桥芯片的桥区



(c) 半导体桥芯片的三维结构

图 1 半导体桥芯片结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of semiconductor bridge chip

将单层 Al 膜与单层 CuO 膜厚度之和视为一个调制周期。将单层 Al 膜与单层 CuO 膜厚度之比视为一个调制比。在横截面相同的情况下, 由所需反应当量比  $\Phi$ 、各组分摩尔质量 (Al: 27 g/mol、CuO: 80 g/mol) 及密度 (Al: 2.700 g/cm<sup>3</sup>、CuO: 6.315 g/cm<sup>3</sup>) 计算得到 Al 和 CuO 的厚度比为 1:2。利用磁控溅射技术, 在半导体桥上溅射沉积 Al/CuO RMFs 和 Al/Cu/CuO RMFs, 薄膜的总厚度均为 3  $\mu\text{m}$ , 具体参数如表 1 所示。

### 1.3 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆测试试验

半导体桥的电爆换能过程主要是指多晶硅材料在受到快速电流驱动下, 由于欧姆焦耳加热作用发生电爆炸现象, 并呈现出了复杂的物理化学变化, 伴随着发光、发热等现象。采用电容放电的快速脉冲

表 1 Al/CuO RMFs 和 Al/Cu/CuO RMFs 的参数设计

Tab. 1 Parameter design of Al/CuO RMFs and Al/Cu/CuO RMFs

RMFs	调制周期/ nm	单层 Al 膜厚 度/nm	单层 Cu 膜厚 度/nm	单层 CuO 膜厚 度/nm	调制周期 数	总厚度/ nm
Al/CuO	225	75		150	13	3 000
Al/Cu/ CuO	230	75	5	150	13	3 000

方式激发 ESCB,记录 ESCB 在电爆过程中的电流、电压等参数,从而研究其电爆规律,试验装置如图 2 所示。采用自行研制的 ALG-CN1 型储能放电起爆仪作为激发源,选用 47  $\mu\text{F}$  的钽电容作为储能电容。首先,按照图 2 所示的电路图连接电路;然后,将 ESCB 样品放置于点火电路中;之后,闭合开关  $S_1$ ,并调节储能放电起爆仪的电压至设定的电压值;待充电完毕后,断开开关  $S_1$ ,闭合开关  $S_2$ ,放电回路被接通,从而 ESCB 发生电爆。此时,示波器(104Xi-A,LeCroy)通过电压探头(PP011,LeCroy)与电流探头(AP015,LeCroy)记录 ESCB 发火件两端的电压以及回路的电流,高速摄影通过储能放电仪的同步触发信号同时拍摄了 ESCB 的电爆过程。试验中的激发电压选取 50 V。

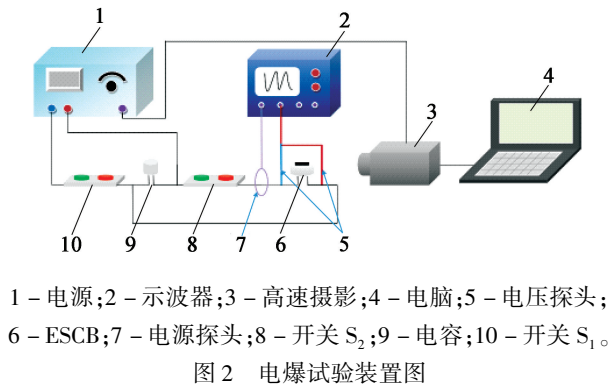


Fig.2 Diagram of electric explosion experimental equipment

2 结果与讨论

半导体桥的电爆特性与外界能量刺激有关。为了分析界面层数量对含能半导体桥电爆特性的影响,结合高速摄影图像分析 50 V、47  $\mu\text{F}$  高能量刺激条件下 SCB 与 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电流、电压曲线和具体的电爆过程。

2.1 SCB、Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆曲线分析

图3为在50 V、47  $\mu\text{F}$ 外界刺激下,SCB的典型

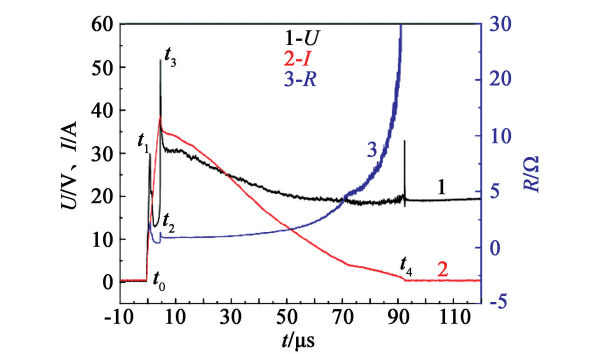


图 3 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 SCB 的典型电压、电流、电阻曲线

Fig.3 Typical voltage curve, current curve and resistance curve of SCB under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{f}$

电压、电流、电阻随时间的变化曲线。为了更好地分析含能半导体桥的电爆过程,根据电压、电流特征曲线定义了一些典型的时刻点。首先,放电回路在  $t_0$  时刻闭合了开关,电压、电流开始快速上升;电压在  $t_1$  时刻上升到第 1 个峰值以后开始下降,在  $t_2$  时刻降至最低点之后又开始快速上升,在  $t_3$  时刻达到第 2 个峰值;最后,电流、电压开始下降,直至电流降为 0。此时,SCB 断裂,电路为断路状态。由图 3 可以看出,对于 SCB,电阻在  $t_0$  至  $t_1$  阶段开始上升,此时,多晶硅电阻随温度的上升而上升;而在  $t_1$  至  $t_2$  阶段,SCB 电阻开始下降,此时,由于多晶硅温度达到了电阻率转换温度,电阻随着温度的上升而下降;此后,多晶硅开始熔化,由于液态多晶硅电阻仅为固态电阻的十分之一,电阻开始迅速上升;最后,在  $t_3$  至  $t_4$  阶段,多晶硅电离过程开始成长,直至湮灭。因此,SCB 的电爆过程可以分为固态升温阶段( $t_0 \sim t_1$ )、转换温度加热及熔化阶段( $t_1 \sim t_2$ )、汽化及开始电离阶段( $t_2 \sim t_3$ )、电离成长及湮灭阶段( $t_3 \sim t_4$ )。

如图 4 和图 5 所示,在电爆过程中,Al/Cu/CuO-ESCB 的电压曲线在  $t_1$  至  $t_2$  阶段出现了一段微弱的平台效应滞胀期。可以明显看出: $t_0 \sim t_3$  阶段,Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的加热、熔化、汽化过程较 SCB 快速完成;而在  $t_3 \sim t_4$  阶段,Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电离的成长与湮灭过程均小于 SCB。

2.2 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆换能过程分析

ESCB 的电爆过程包括多晶硅的电离以及 RMFs 的化学反应。RMFs 的引入会使多晶硅熔化时间变长,而 SCB 的电爆与 RMFs 二者之间的能量作用关系并没有反映。SCB 与 ESCB 的电爆过程迅速,整个过程小于 1 ms。为了尽可能详细地记录 SCB 与 ESCB 的发火过程,借助高速摄影分析 ESCB



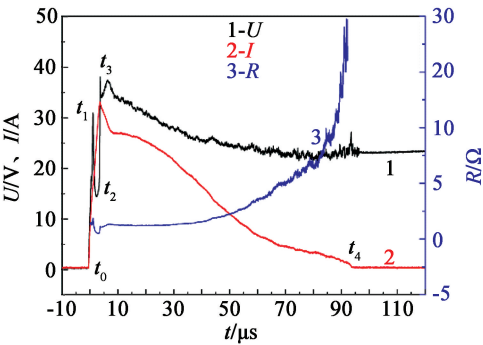


图 4 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 Al/CuO-ESCB 的典型电压、  
电流、电阻曲线

Fig. 4 Typical voltage curve, current curve and resistance  
curve of Al/CuO-ESCB under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{F}$

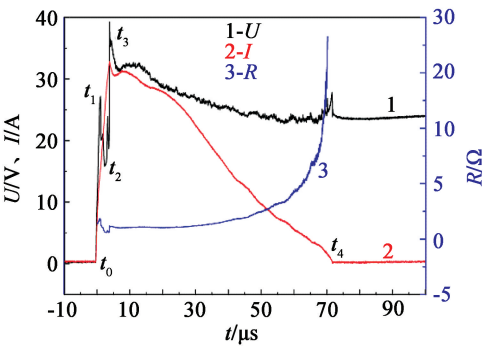


图 5 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 Al/Cu/CuO-ESCB 的典型电压、  
电流、电阻曲线

Fig. 5 Typical voltage curve, current curve and resistance  
curve of Al/Cu/CuO-ESCB under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{F}$

的电爆过程。高速摄影的记录速度设为 50 000 帧/s, 每张图片间隔 20  $\mu\text{s}$ , 设定单幅照片的分辨率为 64 dpi(宽)  $\times$  112 dpi(长)。图 6、图 7 和图 8 分别为 SCB、Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 在 50 V、47  $\mu\text{F}$  外界刺激条件下电爆过程的高速摄影图像。

由图 6 可以看出, 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下, SCB 在 20  $\mu\text{s}$  时产生强烈的白紫色亮光。这些白紫色的亮光多是多晶硅蒸气电离产生的高温等离子体。随后, 亮光逐渐消失, 持续时间大约为 100  $\mu\text{s}$ 。由图 7 和图 8 可以看出: Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 同样在刚开始 0 ~ 20  $\mu\text{s}$  阶段产生了白紫色亮光; 之后, 亮光并没有减弱, 而是产生了黄白色火焰。火焰

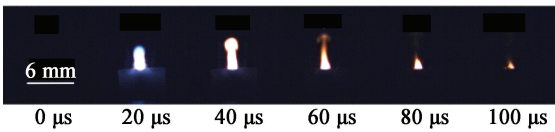


图 6 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 SCB 电爆过程的高速摄影图

Fig. 6 High speed photography of SCB electric explosion  
process under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{F}$

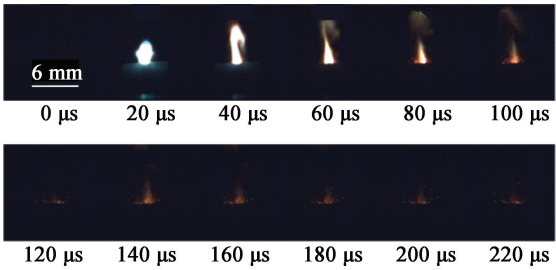


图 7 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 Al/CuO-ESCB 电爆过程  
的高速摄影图

Fig. 7 High speed photography of Al/CuO-ESCB electric  
explosion process under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{F}$

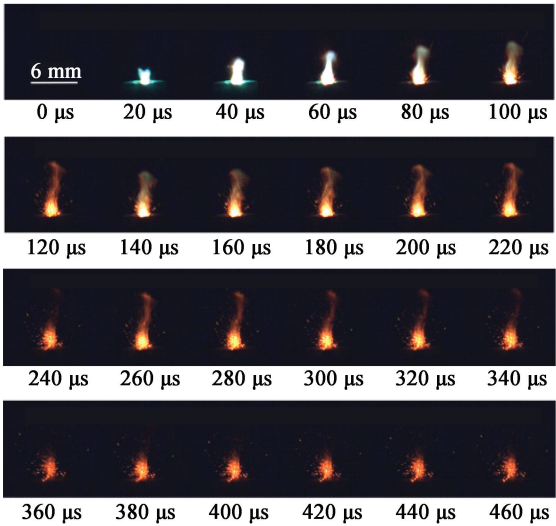


图 8 50 V、47  $\mu\text{F}$  条件下 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆过程  
的高速摄影图

Fig. 8 High speed photography of Al/Cu/CuO-ESCB electric  
explosion process under the condition of 50 V and 47  $\mu\text{F}$

的产生是由于纳米 Al/CuO RMFs 发生了化学反应。火焰的强度、高度和面积随着阻挡层 Cu 层的添加而增大。Al/CuO-ESCB 反应较为强烈, 在 40  $\mu\text{s}$  产生最强亮光后, 由于纳米 Al/CuO RMFs 的反应, 亮光依旧持续并维持到 100  $\mu\text{s}$  之后才开始减弱, 整个反应时间持续为 220  $\mu\text{s}$ 。Al/Cu/CuO-ESCB 的反应最剧烈, 在 20  $\mu\text{s}$  产生白紫色亮光后, 由于增加了阻挡层 Cu 层, 在一定程度上消除了界面层反应性能对纳米 Al/CuO RMFs 能量的影响。可以观察到, 火焰面积、高度继续增大, 并在 200  $\mu\text{s}$  时达到最大, 之后 RMFs 在桥区上继续发生化学反应, 整个反应持续时间达到了 460  $\mu\text{s}$ 。通过对比可以看出, Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 较 SCB 在 50 V、47  $\mu\text{F}$  的能量刺激下产生的白紫色亮光的等离子体大小与持续的时间都有所增大, 火焰燃烧的强度与持续时间都有所增加。

为了进一步分析 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆过程,利用体视显微镜拍摄了 SCB、Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆之后的显微镜照片,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,在相同的电压刺激下,SCB 的电爆面积较小,Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆面积基本与 SCB 相同,但 Al/Cu/CuO-ESCB 的薄膜的反应面积较大,这与图中火焰持续时间的变化规律一致。

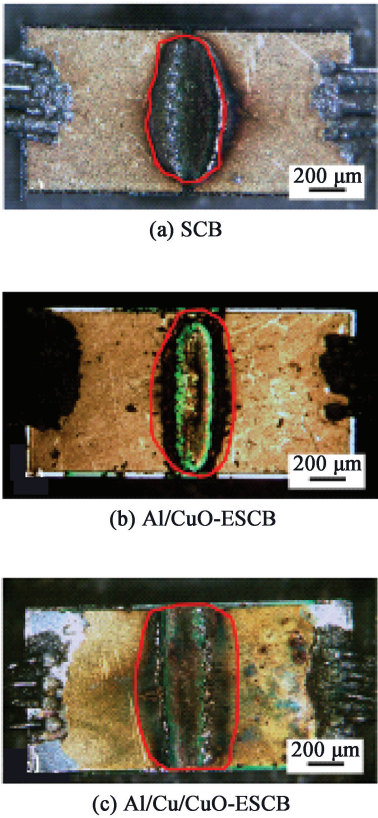


图 9 50 V、47  $\mu$ F 条件下 SCB、Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆后的体视显微镜图

Fig. 9 Stereomicroscopic view of SCB, Al/CuO-ESCB and Al/Cu/CuO-ESCB after electrical burst under the condition of 50 V and 47  $\mu$ F

由图 9 可知,SCB 与 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 多晶硅材料被电爆形成等离子体这一过程基本相同。当多晶硅电爆产生等离子体后,Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 中位于多晶硅桥上方的纳米 Al/CuO RMFs 和纳米 Al/Cu/CuO RMFs 被点燃,发生燃烧反应,产生大量的高温火焰。之后,由于 Al/Cu/CuO 中增加了阻挡层 Cu 层,界面层反应性能受到影响,导致两种材料的火焰燃烧的时间不同。由此也可以看出,后期 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆过程是由于 RMFs 发生的自蔓延燃烧反应。而在 RMFs 点燃的瞬间,Al/CuO-

ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆过程包含了多晶硅的电离以及纳米 Al/CuO RMFs 和纳米 Al/Cu/CuO RMFs 的化学反应。纳米 Al/CuO RMFs 的反应性能能量损失随着调制周期的增加、界面层数量的减少而减小,添加有阻挡层 Cu 层的纳米 Al/Cu/CuO RMFs 的反应性能更活泼,这与 Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 电爆试验结果相一致。由此可知,RMFs 对 ESCB 的增强作用主要体现为 RMFs 自身的反应性能,而通过增加阻挡层的方式,减少在制备过程中由于界面层造成的能量损失,新型结构的 RMFs 对 ESCB 的增强作用也随之增大。

### 3 结论

RMFs 厚度和调制周期不变,研究了 Al/CuO-ESCB 和添加 Cu 阻挡层的 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆特性规律,并与 SCB 电爆特性进行对比。发现通过选择合适的阻挡层,可以改善 ESCB 在 RMFs 制备过程中因界面层导致的能量损失。得出的主要结论如下:

- 1)RMFs 的引入使得 ESCB 的临界爆发时间大于 SCB,添加 Cu 阻挡层的 Al/Cu/CuO-ESCB 的临界爆发时间有所增加。
- 2)在相同外界刺激下,Al/CuO-ESCB 和 Al/Cu/CuO-ESCB 的电爆持续时间、火焰面积、火焰强度均大于 SCB。Al/Cu/CuO-ESCB 的相关参数优于 Al/CuO-ESCB。RMFs 能增强 SCB 的电爆输出性能,Cu 阻挡层能有效提高 ESCB 的电爆输出性能。
- 3)RMFs 在桥区爆炸之前并没有反应,RMFs 的存在会延长桥区 V 尖角的熔化时间。当桥区完全熔化、汽化、被电爆产生等离子体后,RMFs 被点燃,发生自蔓延燃烧反应;之后,ESCB 的电爆情况与 RMFs 的性能和外界刺激能量有关。在相同外界能量刺激下,增加 Cu 阻挡层能有效提高 ESCB 的反应性能。

### 参 考 文 献

[1] AZADMANJIRI J, BERNDT C C, WANG J Y, et al. Nanolaminated composite materials: structure, interface role and applications [J]. RSC Advances, 2016, 6 (111): 109361-109385.

[2] TATON G, LAGRANGE D, CONEDERA V, et al. Micro-chip initiator realized by integrating Al/CuO multilayer nanothermite on polymeric membrane [J]. Journal of

- Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(10): 105009.
- [3] BICKES R W, Jr, GRUBELICH M C, WACKERBARTH D E, et al. A low-ignition energy, SCB, thermite igniter; SAND-96-0480C; CONF-9607122-1 [R]//22nd International Pyrotechnics Seminar. Fort Collins, CO, US, 1996.
- [4] 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.
- [5] HE W, LIU P J, HE G Q, et al. Highly reactive metastable intermixed composites (MICs): preparation and characterization [J]. Advanced Materials, 2018, 30(41): 1706293.
- [6] ZHOU X, TORABI M, LU J, et al. Nanostructured energetic composites: synthesis, ignition/combustion modeling, and applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(5): 3058-3074.
- [7] XU J B, ZHOU Y X, SHEN Y, et al. Characteristics of micro energetic semiconductor bridge initiator by depositing Al/MoO<sub>3</sub> reactive multilayered films on micro bridge with different bridge size [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 336: 113406.
- [8] DUTRO G M, YETTER R A, RISHA G A, et al. The effect of stoichiometry on the combustion behavior of a nanoscale Al/MoO<sub>3</sub> thermite [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 1921-1928.
- [9] BARAS F, TURLO V, POLITANO O, et al. SHS in Ni/Al nanofoils: a review of experiments and molecular dynamics simulations [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(8): 1800091.
- [10] DREIZIN E L. Metal-based reactive nanomaterials [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(2): 141-167.
- [11] 张彬, 褚恩义, 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.
- [12] YU T, XU J B, WANG F, et al. Experimental and modeling investigation on the self-propagating combustion behavior of Al-MoO<sub>3</sub> reactive multilayer films [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(23): 235302.
- [13] ROSSI C. Two decades of research on nano-energetic materials [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(3): 323-327.
- [14] SHI A R, ZHANG W, SHEN R Q. Self-propagating combustion simulation of sputter-deposited nano-energetic multilayer films [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1721(1): 012003.
- [15] MARIN L, NANAYAKKARA C E, VEYAN J F, et al. Enhancing the reactivity of Al/CuO nanolaminates by Cu incorporation at the interfaces [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(22): 11713-11718.
- [16] 杨腾龙, 沈云, 代骥, 等. 一种 Ni-Cr@ Al/CuO 钝感含能元件的制备及性能 [J]. 含能材料, 2019, 27(10): 830-836.
- YANG T L, SHEN Y, DAI J, et al. Fabrication and characterization of a Ni-Cr@ Al/CuO insensitive energetic element [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(10): 830-836.
- [17] SHEN Y, XU J B, WANG C A, et al. Ignition characteristics of energetic nichrome bridge initiator based on Al/CuO reactive multilayer films under capacitor discharge and constant current conditions [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 313: 112200.
- [18] SHI A R, ZHENG H, CHEN Z Y, et al. Exploring the interfacial reaction of nano Al/CuO energetic films through thermal analysis and Ab initio molecular dynamics simulation [J]. Molecules, 2022, 27(11): 3586.