

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.001

基于 Al/MoO_x 纳米复合薄膜的含能半导体桥研究*

付 帅 朱 朋 叶迎华 李东乐 沈瑞琪

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 使用微细加工和磁控溅射技术将 Al/MoO_x 纳米复合薄膜集成于半导体桥(SCB),制成含能半导体桥 $\text{SCB-Al}/\text{MoO}_x$ 以提高 SCB 的点火能力。薄膜的 SEM、DCS 和 XPS 结果表明,复合薄膜成膜质量好,层状结构清晰,放热量可达 3200 J/g ,达到理论值的 68% (理论放热量为 4703 J/g), MoO_x 薄膜含有 32% 的 MoO_3 、37% 的 Mo_2O_5 以及 31% 的 MoO_2 。电容激励发火实验表明:相同激发条件下, $\text{SCB-Al}/\text{MoO}_x$ 反应终止时间较 SCB 显著缩短,能量输出效率高于 SCB,发火时溅射出的火花量明显增多,持续时间显著延长,使用原子发射双谱线测温法得到的等离子体温度亦高于 SCB。

[关键词] Al/MoO_x 纳米复合薄膜 含能半导体桥 点火起爆特性 等离子体测温

[分类号] TJ51 TJ450.1

引言

半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)火工品具有发火能量小、作用迅速、安全性好等诸多特点,自问世以来,受到广泛的关注和应用。国内外对于多晶硅半导体桥的设计、制造和点火起爆应用方面的报道层出不穷;国外对于含能半导体桥等新型半导体桥已进行了许多研究,然而,国内却未见此方面的公开研究报道。因此,开展对含能半导体桥的设计、制备及点火起爆方面的研究具有一定的意义和价值。

选用合适的含能材料与 SCB 进行集成,对于含能半导体桥的设计制备十分重要。纳米含能复合薄膜材料是一种特殊结构形式的纳米铝热剂,由纳米级厚度、可发生合金化反应或氧化还原反应的金属/金属或金属/氧化物薄膜交替叠加而成。由于薄膜中层与层结构紧密,比表面积大,可大大加快各层间的互相渗透,进而提高反应速率和能量转化率。在一定外界激励下,如电火花、激光脉冲等,薄膜材料能发生自蔓延燃烧反应,释放出化学反应热,形成局部高温热源^[1-4],故将其应用于含能半导体,可提高火工品可靠性、降低发火能量。

自 20 世纪 90 年代,国外开始对合金化薄膜进行详细的研究。金属/氧化物薄膜的研究开始较晚,主要集中在 Al/CuO 方面,对于 Al/MoO_x 薄膜的研究未见公开报道。国内对于复合薄膜材料的研究较

多集中在南京理工大学、中国工程物理研究院、香港城市大学等单位,南京理工大学沈瑞琪课题组自 2004 年开始研究反应含能复合桥膜,主要包括基于合金化反应的 Al/Ni 、 Al/Ti ^[5] 薄膜,基于铝热反应的 Al/CuO ^[6-9] 薄膜。

本文选择理论放热量较高的 Al/MoO_x 复合薄膜(Al/MoO_3 理论放热量为 4703 J/g)与 SCB 集成制备出含能半导体桥(简称 $\text{SCB-Al}/\text{MoO}_x$),利用薄膜的化学反应热来提高 SCB 的点火能力。电容激励发火实验表明,集成于 SCB 的 Al/MoO_x 复合薄膜发火时可产生大量火花,并释放热能,对于提高 SCB 的点火能力十分有利。

1 实验

1.1 样品制备

SCB 桥区为双 V 型,V 型夹角 90° ,尺寸为 $380 \mu\text{m}$ (宽) $\times 80 \mu\text{m}$ (长) $\times 2 \mu\text{m}$ (厚),电阻 $(1.3 \pm 0.1) \Omega$,电极焊盘使用金属 Ti/Au ^[10-11]。使用图形反转剥离及磁控溅射工艺在 SCB 上集成厚度为 $3 \mu\text{m}$ 的 Al/MoO_x 复合薄膜,为使复合薄膜组分间接触面积增大,提高化学反应速率,故制备纳米厚度薄膜:单层 Al 膜和 MoO_x 膜厚度分别控制在 30 nm 和 45 nm,之后经剥离、划片、焊丝等工艺,将 $\text{SCB-Al}/\text{MoO}_x$ 封装于陶瓷塞,制成实验样品。其结构示意图和实物形貌如图 1 所示。

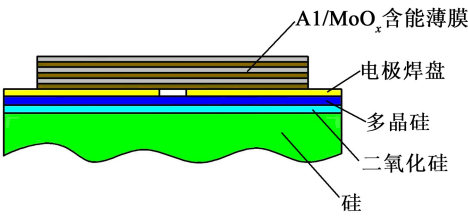
1.2 样品发火特性测试和薄膜性能表征

* 收稿日期:2013-06-04

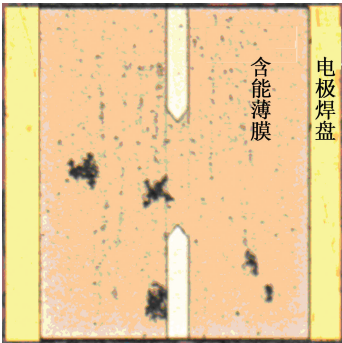
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51201091)

作者简介:付 帅(1989~),男,硕士研究生,主要从事含能材料的研究。E-mail:fsfsfs123@yeah.net

通信作者:朱 朋(1978~),男,助理研究员,主要从事火工技术与薄膜材料研究。E-mail:zhupeng05@hotmail.com



(a)



(b)

(a) 结构图; (b) 俯视图

图 1 SCB-Al/MoO_x 的结构示意图及样品俯视图

Fig. 1 Structural representation and optical image of SCB-Al/MoO_x

实验选用 47 μF 固体钽电容作为点火激发源, 电路示意图如图 2。实验时, 首先闭合开关 A 为电容充电, 之后断开 A 并闭合 B, 样品受电流作用发火。将 ALG-CNI 储能放电起爆仪(南京理工大学研制)作为充电源, 用数字示波器(LeCroy44Xs)记录发火电压、电流随时间变化曲线, 用高速摄影仪(HG-100K)记录发火影像, 双谱线测温仪记录样品发火生成的等离子体的温度。

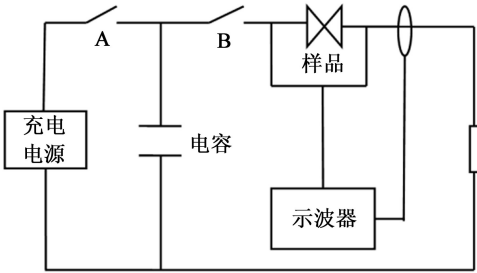


图 2 点火电路示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the igniting circuit

在样品制备之前, 首先对 Al/MoO_x 纳米复合薄膜的基本性能进行表征分析。使用荷兰 FEI 公司生产的 Sirion 2000 场发射扫描电子显微镜(FESEM)观测薄膜横截面层状结构; 使用 PHI Quantera II 扫描 XPS 探针仪对薄膜化学元素状态进行分析, 以 Al K _{α} 线为 X 射线源, 绝对灵敏度高达 10^{-18} g, 背景真空度低于 6.7×10^{-8} Pa, 结合能数据利用真空系统中最常见的有机污染碳的 C 1s 结合能 284.6 eV

进行校正, 全谱扫描能量范围为 0 ~ 1200 eV, 步长 1 eV, 芯能级扫描步长为 0.05 eV; 使用德国 NETZSCH STA 449 C 型同步热分析仪对复合薄膜进行热分析, 实验采用 Ar 气氛, 气体流量 20 mL/min, 取样品量 3.0 mg 左右, 升温区间 30 $^{\circ}\text{C}$ 至 1200 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率 50 K/min。

2 结果与讨论

2.1 Al/MoO_x 复合薄膜性能

Al/MoO_x 纳米复合薄膜的 FESEM、XPS 和 DSC 的实验结果如图 3、图 4、图 5 所示。

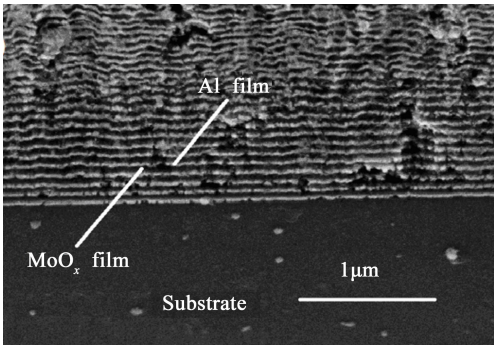


图 3 Al/MoO_x 纳米复合薄膜截面的 SEM 图

Fig. 3 SEM of the cross section of Al/MoO_x nano multilayer films

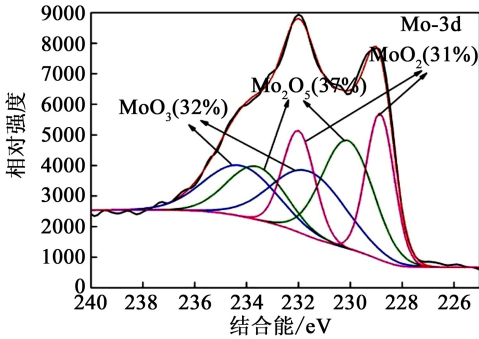


图 4 Al/MoO_x 纳米复合薄膜表面 MoO_x 中的 Mo-3d 的 XPS 芯能级扫描图谱

Fig. 4 XPS core level spectrum of Mo-3d in MoO_x on the surface of Al/MoO_x nano multilayer films

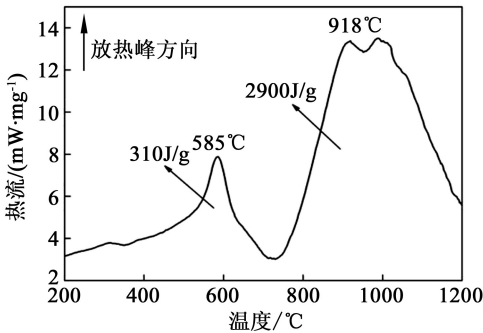


图 5 Al/MoO_x 纳米复合薄膜 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of Al/MoO_x nano multilayer films

FESEM 结果显示, 复合薄膜层状结构清晰, 各

层厚度均匀,层与层之间连接紧密无翘起;MoO_x 薄膜的 XPS 结果显示,MoO_x 薄膜中含有 32% 的 MoO₃、37% 的 Mo₂O₅ 以及 31% 的 MoO₂,故 MoO_x 中 O 的下标使用 x 代替;DSC 结果显示,复合薄膜反应起始温度在 560℃ 左右,薄膜放热量约 3200 J/g,达到理论放热量 4703 J/g^[12] 的 68%,此放热量高于其他常见的复合薄膜材料^[2-5]。造成薄膜放热量与理论值存在差距的原因主要有以下 3 点:

1) 薄膜在溅射成膜过程中不可避免地形成诸如空洞、晶格错位等缺陷,造成薄膜密度与体密度存在差异,致使理论计算得到的薄膜调制周期与薄膜反应的化学计量比存在差距;

2) 由于 O 的相对分子质量较小;在溅射过程中易受到 Ar⁺ 和其他中性粒子影响;在移动至基片的过程中,部分 O 的运动方向发生偏移,未能沉积到基片上,造成基片上的薄膜发生 O 缺失现象,从 XPS 发现 MoO_x 薄膜中存在 MoO₃、Mo₂O₅ 和 MoO₂ 3 种结构的结果中可得到进一步验证;

3) 纳米厚度的 Al 在沉积过程中有一部分被氧化成 Al₂O₃,致使实际参与薄膜铝热反应的 Al 的量少于设计配比量。

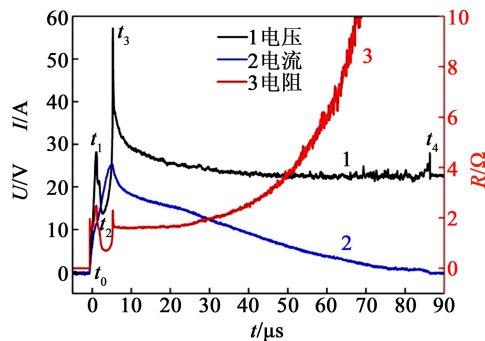
2.2 含能半导体桥电爆特性

2.2.1 发火特性曲线

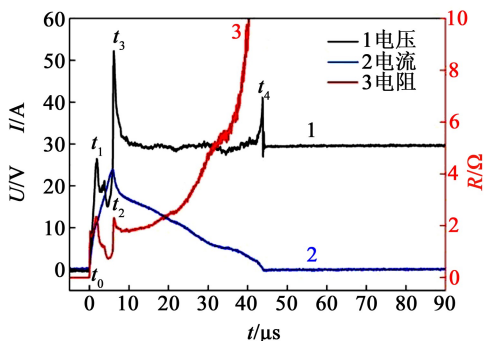
为了更好地显示含能半导体桥 SCB-Al/MoO_x 在电爆换能方面的优越性,加入与 SCB-Al/MoO_x 各项参数相同,但是未集成有纳米复合薄膜的 SCB 裸桥的电爆结果,通过二者之间的对比来分析 SCB-Al/MoO_x 与普通 SCB 的异同之处。

充电电压为 40V 时,SCB 与 SCB-Al/MoO_x 发火的典型电流、电压和电阻随着时间的变化曲线如图 6。SCB-Al/MoO_x 的电流、电压和电阻曲线与 SCB 的相似,亦可分为桥升温(t_0 至 t_1)、熔化(t_1 至 t_2)、汽化(t_2 至 t_3) 和等离子体加热(t_3 至 t_4) 4 个阶段^[13-15]。

图 6 中, t_4 时刻桥区完全断开,称为电能作用于桥区的终止时间,此时刻对应电流曲线降至零值时刻。比较图 6,相同条件下,SCB-Al/MoO_x 与 SCB 的电流、电压和电阻曲线在 t_3 时刻之前无显著性差别,但 SCB-Al/MoO_x 的等离子体加热时间较 SCB 显著缩短,致使 SCB-Al/MoO_x 的终止时间显著前移,且随着充电电压的增大,二者的终止时间差值亦增大,最大差值可达 50% 左右。同时发现,当充电电压小于 22.5 V 后,SCB-Al/MoO_x 的终止时间较 SCB 反而延长,如图 7 所示。SCB 与 SCB-Al/MoO_x 的终



(a)

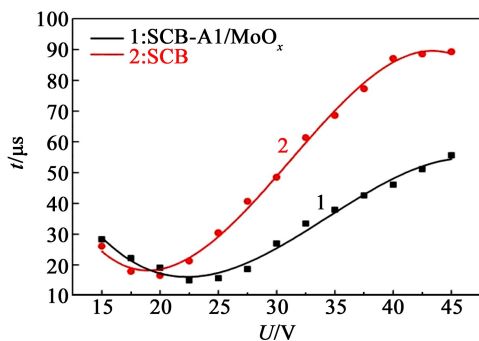


(b)

(a) SCB; (b) SCB-Al/MoO_x

图 6 电流、电压、电阻随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of current, voltage and resistance changing with time

图 7 SCB 与 SCB-Al/MoO_x 在不同充电电压下的终止时间Fig. 7 Terminal times of SCB and SCB-Al/MoO_x under different charge voltages

止时间随电压的增大均呈高次多项式关系。

分析认为,造成 SCB-Al/MoO_x 的终止时间较 SCB 缩短的原因主要是 SCB-Al/MoO_x 桥区电离生成高温等离子体,激发了覆盖于其上的复合薄膜,薄膜发生铝热反应放出大量热,热量向下传导至桥区,加速了桥区的电离熔断速率,致使终止时间显著缩短;其次,薄膜反应生成的 Al₂O₃ 和 Mo 的沸点较高 (Al₂O₃ 沸点 3250 K, Mo 沸点 5833 K),加之 Al₂O₃ 导电性差,因此,对等离子体电加热过程产生了一定影响;随着电压的增大,SCB-Al/MoO_x 桥区电离生成

等离子体时间缩短,能量升高,被激发反应的复合薄膜面积增大,薄膜放热量增大,单位时间作用于桥区的能量增加,故使 SCB-Al/MoO_x 与 SCB 终止时间差值增大。充电电压小于一定值后,SCB-Al/MoO_x 的终止时间较 SCB 反而延长,其原因可能是因为低电压激励下,桥区发火输出能量有限,不能迅速激发复合薄膜反应,未反应的薄膜覆盖于桥区起到约束绝热作用,致使 SCB-Al/MoO_x 等离子体加热时间延长,终止时间长于 SCB。

2.2.2 能量输出效率

在某一电压下,将样品发火输出能量与激发电容的总能量之比定义为样品的能量输出效率,数学表达式如式(1):

$$\eta = Q_{\text{out}} / (CU^2/2) \quad (1)$$

式中: C 为电容; U 为充电电压。

将测得的电流、电压随时间变化曲线相乘,并积分可得到输入样品的电能 Q_{in} ,如式(2):

$$Q_{\text{in}} = \int_{t_0}^{t_4} U(t) \cdot I(t) dt \quad (2)$$

对于 SCB,输出能量 Q_{out} 等于 Q_{in} ,而对于 SCB-Al/MoO_x 还需加上复合薄膜反应释放的能量,由于直接测量复合薄膜释放能量较困难,故采用理论计算,如式(3):

$$Q_{\text{out}}(\text{SCB-Al/MoO}_x) = Q_{\text{in}} + SdpQ \quad (3)$$

式中: S 为复合薄膜反应面积,通过测量发火后样品表面薄膜燃烧反应面积获得,如图 8 红色线段包围区域; d 为薄膜厚度; ρ 为薄膜密度,近似等于材料体密度; Q 为薄膜 DSC 放热量。

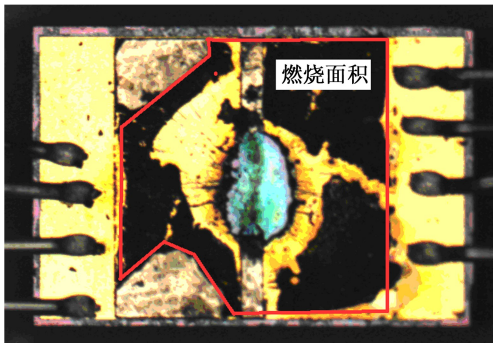


图 8 SCB-Al/MoO_x 发火后形貌图

Fig. 8 Optical image of the fired SCB-Al/MoO_x

根据式(1)计算得到不同充电电压下 SCB 与 SCB-Al/MoO_x 的能量输出效率,如图 9 所示。

图 9 中,SCB 的能量输出效率与充电电压呈高次多项式关系,且最大效率未能超过 50%;SCB-Al/MoO_x 的能量输出效率随着电压的降低呈指数衰减关系,衰减函数为 $\eta = 0.153 \exp(U/26.134) + 0.106$ 。随着电压增大,等离子体加热时间增长,电

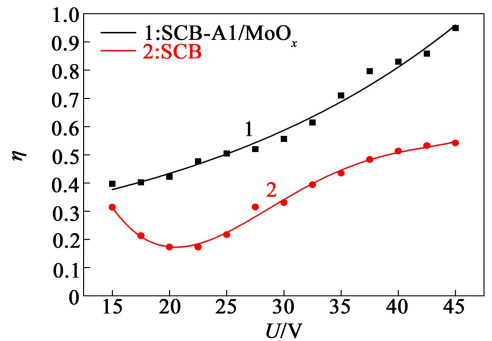


图 9 SCB 与 SCB-Al/MoO_x 在不同充电电压下的能量输出效率

Fig. 9 Energy output efficiencies of SCB and SCB-Al/MoO_x under different charge voltages

能作用于等离子体能量增大,加之复合薄膜反应面积增大,输出能量亦增大,致使 SCB-Al/MoO_x 的能量输出效率随着电压的增大而增大。相同激发条件下,虽然 SCB-Al/MoO_x 的等离子体加热时间较 SCB 缩短,致使电能作用于 SCB-Al/MoO_x 的能量小于 SCB,但是,由于纳米复合薄膜反应放出大量热,致使 SCB-Al/MoO_x 能量输出效率均大于 SCB,其最大效率甚至可达 95% 以上。较高的输出效率可实现火工品低输入、高输出的目的,有利于火工品小型化,且 SCB-Al/MoO_x 瞬时输出能量的增加有利于提高火工品的点火能力。

2.2.3 双谱线测温 and 高速摄影

由于 SCB 生成的等离子体温度高、尺寸小及速度快,使用一般的温度测试方法很难进行测量,故选用原子发射双谱线测温方法进行测量^[16-18],选择 CuI 510.5 nm、CuI 521.8 nm 两条原子谱线进行计算,典型测温结果如图 10 所示。

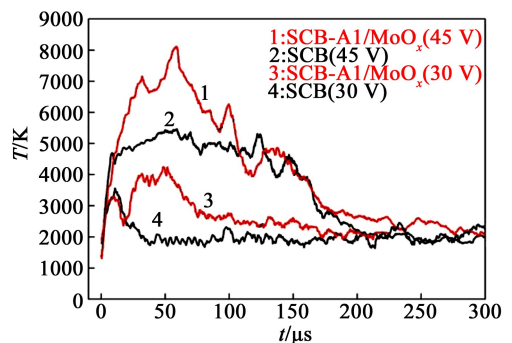
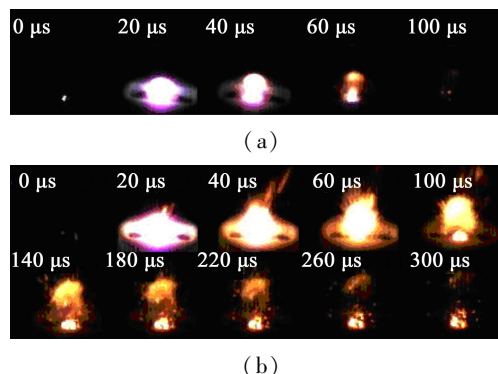


图 10 SCB 与 SCB-Al/MoO_x 在不同电压下温度随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of temperature changing with time of SCB and SCB-Al/MoO_x under different charge voltages

样品通电发火以后,温度迅速上升,SCB 与 SCB-Al/MoO_x 等离子体温度在 45 V 时分别达到 7000 K 和 5000 K,30 V 时分别达到 4000 K 与 2000

K, SCB-Al/MoO_x 等离子体温度较 SCB 提高近 40% ; 等离子体温度在高温段持续一段时间后, 随着等离子体冷却而逐渐降低, 45 V 时, SCB 与 SCB-Al/MoO_x 等离子体高温持续时间可达 160 μs, 30 V 时, SCB-Al/MoO_x 等离子体高温持续时间近 60 μs, 而 SCB 持续时间仅 25 μs。此结果与高速摄影得到的发火影像结果较为一致, 如图 11 所示, 图片采样率为 50000 帧/秒, 时间间隔为 20 μs, 充电电压为 40 V。



(a) SCB; (b) SCB-Al/MoO_x

图 11 高速摄影图像

Fig. 11 High speed camera observation

比较样品发火图像, 在发火初期 20 μs 时, SCB 与 SCB-Al/MoO_x 桥区受电流激发而电离, 均生成了明亮的等离子体, 等离子体尺寸接近 2 mm, 之后, 随着桥的熔断, SCB 生成的等离子体快速冷却并消失, 60 μs 后已经非常微弱, 100 μs 后完全消失; SCB-Al/MoO_x 中的 SCB 电离生成高温等离子体, 随后冲破并点燃了覆盖于其上的 Al/MoO_x 复合薄膜, Al 与 MoO_x 发生快速的铝热反应, 放出大量的热, 同时随多晶硅电离产生的等离子体共同喷溅出大量的高温火花, 40 μs 时已发现薄膜开始燃烧并溅射出高温碎片, 300 μs 时仍然有薄膜碎片在燃烧。相同激发条件下, SCB-Al/MoO_x 较 SCB 生成的等离子体温度高, 发火生成的火花量多, 火花持续时间长, 对于提高火工品的点火能力十分有利。

3 结论

利用磁控溅射工艺, 制备出层状结构清晰、放热量达 3200 J/g 的 Al/MoO_x 纳米复合薄膜, 利用微细加工技术, 将复合薄膜集成于 SCB 制备出含能半导体桥 SCB-Al/MoO_x。

发火实验表明: SCB-Al/MoO_x 中的复合薄膜受底层 SCB 电离生成的高温等离子体激发而发生铝热反应, 反应放出的大量热加速了桥区的电离熔断速率, 致使终止时间较 SCB 显著缩短; 相同激发条件下, SCB-Al/MoO_x 的能量输出效率高于 SCB,

SCB-Al/MoO_x 的最高输出效率甚至可达 95% 以上。

双谱线测温结果显示, SCB-Al/MoO_x 发火生成的等离子体峰值温度高于 SCB, 且薄膜的铝热反应使 SCB-Al/MoO_x 发火时溅射出的火花量显著增加, 对提高火工品点火能力十分有利。

参考文献

- [1] Zhang K, Rossi C, Petrantonì M, et al. A nano initiator realized by integrating Al/CuO-based nanoenergetic materials with a Au/Pt/Cr microheater [J]. The Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17 (4): 832-836.
- [2] Rogachev A S. Exothermic reaction waves in multilayer nanofilms [J]. Russian Chemical Reviews, 2008, 77 (1): 21-37.
- [3] Rogachev A S, Mukasyan A S. Combustion of heterogeneous nanostructural systems (Review) [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2010, 46(3): 243-266.
- [4] 王亮, 何碧, 蒋小华, 等. 多层膜自持反应的数值模拟 [J]. 含能材料, 2009 (2): 1-4.
Wang Liang, He Bi, Jiang Xiaohua, et al. Modeling the propagating velocity of reaction waves in Al/Ni multilayer films [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009 (2): 1-4.
- [5] Yang Cheng, Hu Yan, Shen Ruiqi, et al. Fabrication and performance characterization of Al/Ni multilayer energetic films [J]. Applied Physics A, 2013: 1-6.
- [6] Zhu Peng, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Characterization of Al/CuO nanoenergetic multilayer films integrated with semiconductor bridge for initiator applications [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113 (18): 184505-184505-5.
- [7] Zhou Xiang, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(9): 094505-094505-6.
- [8] Zhu Peng, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(7): 074513-074513-5.
- [9] Zhu Peng, Shen Ruiqi, Fiadosenka N N, et al. Dielectric structure pyrotechnic initiator realized by integrating Ti/CuO-based reactive multilayer films [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(8): 084523-084523-6.
- [10] 杨贵丽, 焦清介. 双 V 型半导体桥电阻计算方法研究 [J]. 火工品, 2009(3): 1-5.
Yang Guili, Jiao Qingjie. Study on calculation method for resistance of double V-shaped semiconductor bridge [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2009(3): 1-5.

- [11] 周彬, 秦志春, 毛国强. 半导体桥长宽比对其发火性能的影响[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 235-237.
Zhou Bin, Qin Zhichun, Mao Guoqiang. Influence of ratio of length to width of semiconductor bridge on its firing performance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 33(2): 235-237.
- [12] Fischer S H, Grubelich M C. Theoretical energy release of thermites, intermetallics, and combustible metals [R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US), 1998.
- [13] 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, 38(2): 21-24.
Zhang Wenchao, Zhang Wei, Xu Zhenxiang, et al. Progress and development on semiconductor bridge initiator [J]. Explosive Materials, 2009, 38(2): 21-24.
- [14] 祝逢春, 秦志春, 陈西武, 等. 半导体桥的设计分析[J]. 爆破器材, 2004, 33(2): 22-25.
Zhu Fengchun, Qin Zhichun, Chen Xiwu, et al. Analyses on semiconductor bridge design [J]. Explosive Materials, 2004, 33(2): 22-25.
- [15] 马鹏, 朱顺官, 徐大伟, 等. 半导体桥电容放电特性研究[J]. 火工品, 2010(2): 1-4.
Ma Peng, Zhu Shunguan, Xu Dawei, et al. Study on ignition character of semiconductor bridge[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2010(2): 1-4.
- [16] Ma Peng, Zhang Lin, Zhu Shunguan, et al. Non-plasma ignition of lead styphnate by a semiconductor bridge and its comparison with plasma ignition[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011, 47(1): 103-109.
- [17] 张琳, 冯红艳, 吴蓉, 等. 瞬态小尺寸等离子体的判断及光谱法表征[J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1435-1439.
Zhang Lin, Feng Hongyan, Wu Rong, et al. Diagnosis and judgment of transient and small-size plasma with spectroscopic method[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11): 1435-1439.
- [18] 冯红艳, 李艳, 张琳, 等. 原子发射光谱双谱线法测量半导体桥(SCB)等离子体温度[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 134-136.
Feng Hongyan, Li Yan, Zhang Lin, et al. Measurement of the semiconductor bridge (SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(2): 134-136.

Characterization of Energetic Semiconductor Bridge Realized by Integrating Al/MoO_x Nano Multilayer Films

FU Shuai, ZHU Peng, YE Yinghua, LI Dongle, SHEN Ruiqi

School of Chemical Engineering, Nanjing university of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] An energetic semiconductor bridge, SCB-Al/MoO_x, was made using Al/MoO_x nano multilayer films integrated with semiconductor bridge (SCB) by micro machining technology and magnetron sputtering technology, and accordingly its ignition capacity was enhanced. The Al/MoO_x films were identified by SEM, DSC and XPS. Results show that distinct Al/MoO_x multilayer films are formed by means of sputter deposited on a layered geometry. The heat generation could reach to 3200 J/g, which is 68% of the theoretical value (4703 J/g). MoO_x films contain MoO₃ (32%), Mo₂O₅ (37%) and MoO₂ (31%), respectively. In capacitance triggered firing experiments, the terminal time of SCB-Al/MoO_x reaction is shorter, while the energy output efficiency is higher than those of SCB. Moreover, sparks in the fire increase obviously, and their duration time is extended. The exothermic reactions in Al/MoO_x films sustain SCB to generate plasma of higher temperatures.

[KEY WORDS] Al/MoO_x nano multilayer films; Energetic semiconductor bridge; Ignition character; Plasma temperature