

文章编号: 1006-9941(2012)01-0099-06

半导体桥静电作用前后点火特性

郭晓荣, 朱顺官, 张琳, 马鹏, 陈飞, 王大为

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 对静电作用过的半导体桥和未经受静电作用的半导体桥进行 D-最优化点火实验, 得到全发火电压, 并在全发火电压下点火, 用示波器采集电压、电流以及发火时间等信号, 用显微镜观察桥面的烧蚀情况并计算烧蚀面积。分析得到: 静电对半导体桥的桥膜产生了损伤, 静电电压越大, 烧蚀面积越大; 经过静电作用的桥与未静电作用的桥相比, 全发火电压降低, 发火能量减小, 桥变得更加敏感。对全发火电压下的发火能量和发火时间进行 t 检验, 得到 21 kV 是临界值, 静电电压大于 21 kV, 静电对桥的性能影响明显; 小于 21 kV, 静电对桥的影响不大。

关键词: 军事化学与烟火技术; 半导体桥; 静电放电; 烧蚀面积; 电容放电; t 检验

中图分类号: TJ55; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.01.024

1 引言

半导体桥 (semiconductor bridge, SCB) 是用金属半导体膜或金属-半导体复合膜作为换能元的灵巧点火器, 它具有发火能量低、作用快、安全性好、工艺一致性好等优点, 目前已经得到了广泛的应用^[1-4]。

尽管以 SCB 为换能元的火工品本身已具有较好的抗静电能力^[5-6], 但是静电放电 (ESD) 产生的电火花会造成半导体桥火工品的早爆或性能变化, 从而对火工品产生危害。穆丽军等人^[7]在分析电火工品静电作用机理的基础上, 利用瞬态脉冲试验原理研究了 ESD 对电火工品的性能影响, 并指出经过 ESD 试验后, 电火工品温升值变大, 平均作用时间变长, 提出了可以用瞬态脉冲试验法检测经 ESD 后电火工品的性能变化。常悦等^[8]通过测量电火工品桥丝在电磁环境下的温度变化, 利用传感器测得桥丝温度与调理器输出的感应电压的关系, 测量出桥丝上的感应电压, 进而对电火工品进行 ESD 的效应评估。

在国外, W. C. Prinse^[9]等人对 SCB 换能元进行了恒流测试, 通过破坏性试验和非破坏性试验, 得到:

一般 SCB 的作用过程是固态→液态→等离子体; SCB 熔化所需能量跟脉冲形状无关, 并且就不发火电流和对人体静电的防护方面而言, 应用前途光明。在国内, ESD 对 SCB 的损伤研究得很少, 故研究 SCB 在 ESD 前后的损伤情况和点火特性很有必要, 一方面, 研究结果可以作为判别暴露于电磁环境的 SCB 失效与否的一个判据; 另一方面, SCB 对 ESD 的响应, 有其作为半导体材料和微电子器件的特殊性规律, 可以为研究 SCB 火工品的静电防护提供一定依据。

2 SCB 的作用原理及静电感度测试

2.1 SCB 点火原理与装置

SCB 的点火机理是等离子体微对流作用^[10]。具体的作用过程是: 来自电源系统的脉冲电流流经半导体桥, 使其加热、汽化直至击穿, 形成高温 (4000 K 以上)、高压等离子气体; 灼热的硅等离子气体颗粒通过微对流运动渗入到与其相邻的点火药中, 并在点火药颗粒上凝结、把能量传递给点火药颗粒进而诱发化学反应, 使其点燃^[11]。

点火装置如图 1 所示。

2.2 静电感度测试方法

作用机理: ESD 作用可以等效看成是一个充电至一定电压的电容器在电火工品的脚线-脚线或脚线-壳体之间通过一规定电阻放电, 测定在规定条件下的发火率或发火电压。

收稿日期: 2011-01-21; 修回日期: 2011-03-06

作者简介: 郭晓荣 (1987-), 女, 硕士, 主要从事半导体桥点火研究。

e-mail: Nancy1987425@126.com

通讯联系人: 朱顺官 (1962-), 男, 研究员, 主要从事半导体桥的点火和新型火工药剂的制备研究。e-mail: zhusg@mail.njust.edu.cn

实验电路图如图 2 所示。

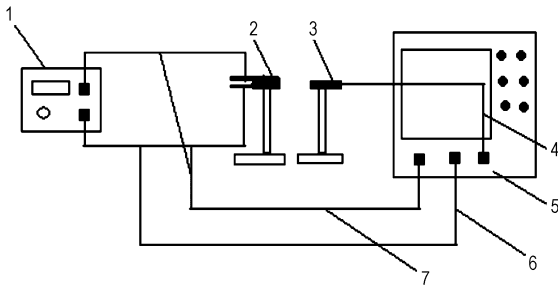


图 1 点火实验电路图

1—放电设备, 2—SCB 样品, 3—光探头, 4—光通道, 5—示波器, 6—电流通道, 7—电压通道

Fig.1 Ignition circuit diagram

1—discharging equipment, 2—charge, 3—optic probe, 4—light channel, 5—oscilloscope, 6—current channel, 7—voltage channel

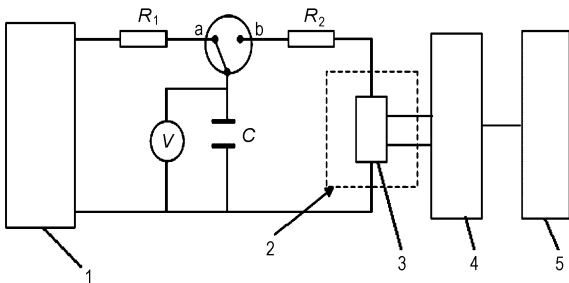


图 2 静电感度实验原理图

1—直流高压电源, 2—爆炸箱, 3—试样, 4—示波器, 5—UPS

Fig.2 Schematic diagram of the electrostatic sensitivity

1—DC high voltage power supply, 2—explosion box, 3—the sample, 4—oscilloscope, 5—UPS

3 测试仪器、样品参数及测试方法

3.1 测试仪器

JGY-50Ⅲ静电感度测试仪, 示波器 (LeCroy44Xs), 储能电容 C , 放电电阻 R_2 , UPS 直流稳压电源; ALG-CNI 储能放电起爆仪; 光电二极管 (3DUOC); 直流稳压电源 (JWY-30B 型); KH-7700 三维视屏显微镜; 激光共聚焦显微镜 (OLS 3100); 斯蒂芬酸铅 (LTNR) 为自制药剂。

3.2 样品参数

半导体的规格为 $80 \mu\text{m}(L) \times 380 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$ 的 n 型重掺杂 poly-SCB, 电阻约为 1Ω 。

装药结构图如图 4 所示。

3.3 测试方法

GJB5309.14 - 2004 火工品试验方法——静电放电试验规定的实验条件: 储能电容为 500 pF , 电阻 5000Ω , 在此条件下进行 ESD 实验以及点火, 达到最大

量程 50 kV 时, SCB 仍然不会出现影响其性能的损伤情况, 由于本实验着力于 ESD 对 SCB 的损伤特性, 以便今后研究 SCB 的静电防护措施, 而适当选择大电容, 可以达到要求, 所以试验中选择储能电容 C 为 10000 pF , 放电电阻 R_2 为 5000Ω 。

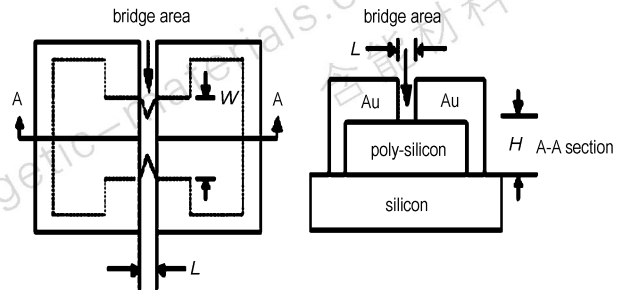


图 3 SCB 的结构示意图

Fig.3 Structure of the semiconductor bridge

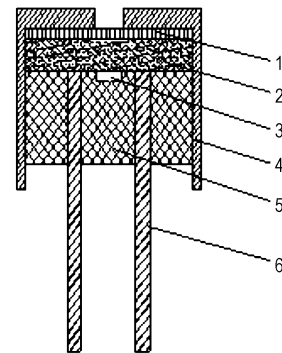


图 4 装药结构图

1—纸垫片, 2—起爆药, 3—半导体桥, 4—管壳, 5—陶瓷塞, 6—脚线

Fig.4 Structure of charge

1—paper gasket, 2—primary explosive, 3—SCB, 4—casing, 5—ceramic plug, 6—leg wire

静电放电实验: 将示波器接入图 2 所示的电路, 为防止静电放电对示波器产生干扰, 选择示波器的电源与静电放电仪器的电源分开, 示波器采用 UPS 直流稳压电源供电。实验开始前将 UPS 充电, 然后断开 UPS 的电源线, 将 UPS 与示波器连接, 即示波器的电源由 UPS 供应。实验时, 先对电容充电; 再利用电子转换开关, 使放电回路接通, 电容放电, 电流脉冲对 SCB 作用, 用示波器采集电路中的电流信号以及半导体桥两端的电压信号。示波器用 UPS 供电时受到的干扰仍然很严重, 滤波有相当的难度, 故 ESD 过程中采集到的数据, 仅仅作为 ESD 过程中 SCB 中电流、电压作用情况的辅助参考数据。

点火实验选用的药剂为斯蒂芬酸铅, 每发装

20 mg, 压药压力为 120 MPa, 使用 47 μF 的电容器作为储能元件, 对 ESD 前后的 SCB 进行点火, 用示波器采集电流、电压以及出光信号。

4 测试结果与讨论

4.1 ESD 前后桥的表面烧蚀面积的对比

静电对 SCB 的作用, 最先受到损伤的是桥的尖角区域^[12]。静电电压增大后, SCB 的中间部位也受到损伤。试验中的电压比较小, 桥区的两个尖角区域呈现对称性的烧蚀图像, 为了更直观地分析, 取其中一个尖

角区域的图像说明。

随着 ESD 电压的增大, 桥表面烧蚀情况如图 6 所示, 其烧蚀面积占桥区总面积的分数对比见表 1。

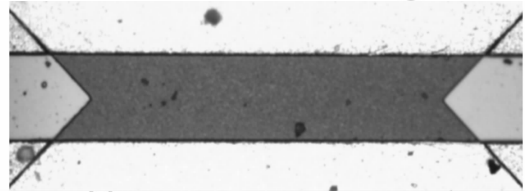
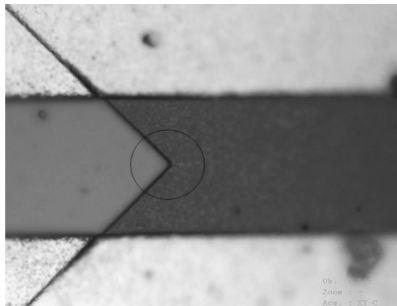
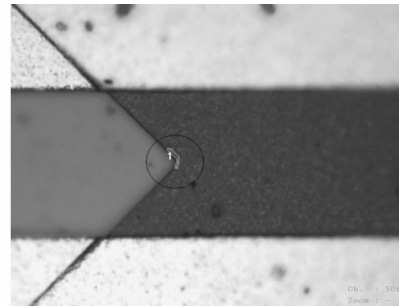


图 5 完整的 SCB (no ESD)

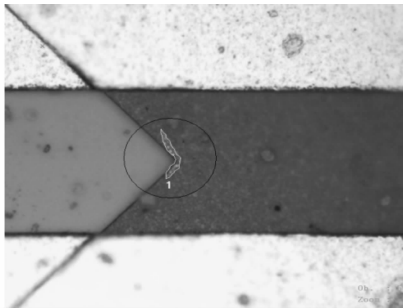
Fig. 5 Whole semiconductor bridge (pre-electrostatic discharge)



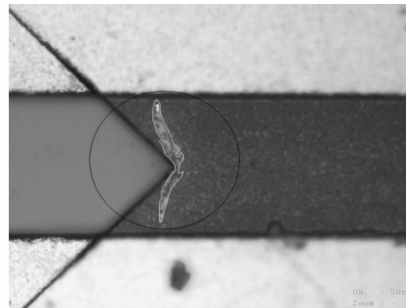
a. no ESD



b. 22 kV voltage



c. 23 kV voltage



d. 26 kV voltage

图 6 静电放电实验后 SCB 的桥形图

Fig. 6 Diagrams of SCB after ESD experiment

表 1 不同 ESD 电压下桥区烧蚀面积与桥区总面积之比

Table 1 The ratio of the ablation areas to the total bridge areas under the different electrostatic discharging voltages

		ESD/kV			
		21	22	23	26
0	21	0.04	0.16	0.46	1.97

从图 6 以及表 1 中看出, 静电放电对 SCB 桥区产生了损伤, 随着 ESD 电压的升高, SCB 桥区的烧蚀面积逐渐增大, 说明 ESD 确实对 SCB 产生了影响, 但是由于放电电压很小, 桥的表面只有极小一部分发生了作用 (如表 1 所示), 大部分桥面保持完整, 并且作用的部位主要集中在尖角区域; 另外由于输入能量比较小, 结合示波器的电流电压曲线可以知道, 这种情况下的固体硅

材料只发生了熔化, 但是会影响 SCB 的点火可靠性。

4.2 ESD 前后 SCB 的电容放电特性比较

采用 D-最优化法程序进行点火, 得到药剂 50% 发火的电压期望和标准差估计, 进一步计算得到 99.9% 的发火电压作为全发火电压, 通过对比不同 ESD 作用的 SCB 点火的全发火电压, 确定 ESD 作用后 SCB 的失效阈值。

对未经过 ESD 作用的 SCB 和经过 ESD 作用的 SCB 在各自的全发火电压下进行点火实验, 每个条件下测试 20 发。结果见表 2。

点火电压大于 15 V 时半导体桥会产生等离子体^[13], 本实验的所有点火电压均小于 8 V, 故都不属于等离子体点火, 属于非等离子体点火。

表 2 静电作用前后 SCB 的点火性能

Table 2 Firing characters between non-ESD and ESD

ESD/kV	whole ignition voltage/V	50% ignition voltage/V	no ignition voltage/V	ignition time/ μ s	ignition energy/ μ J	peak current/A	time to peak current/ μ s
0	7.48	7.20	6.78	68.17	818.03	4.27	1.24
21	7.43	6.71	6.02	72.25	811.25	4.25	1.39
22	7.34	7.03	6.24	75.09	775.14	4.19	1.62
23	7.23	6.81	6.09	81.05	737.86	4.11	1.99
26	6.90	6.58	6.31	83.07	682.91	4.00	2.56

4.2.1 全发火电压的对比

由表 2 可以看出,未 ESD 作用的半导体桥全发火电压是 7.48 V,经过 ESD(21 kV、22 kV、23 kV、26 kV)作用的桥其全发火电压略有降低,说明 ESD 作用已经对 SCB 的性能产生了影响,使桥变得更加敏感,并且作用在 SCB 上的静电电压越大,其点火时的全发火电压越低。这样的结果是由于 ESD 导致 SCB 桥面部分熔化(如图 6 所示),使桥膜受到了损伤,影响了其发火性能。

4.2.2 发火能量的对比

桥作用于药剂的能量是从开始放电到电流断开积分的能量, $E = \int UIdt$ 。

由表 2 可以看到,ESD 后 SCB 的发火能量均比未 ESD 的 SCB 发火能量低,并且随着 ESD 电压的增大,SCB 的点火能量呈递减的趋势,原因是静电对 SCB 作用时虽未导致其发火,但是已经对桥膜产生了冲击,对桥膜造成了一定的损伤,导致桥膜变得更加敏感,更容易发火,造成不安全。

4.2.3 发火时间的对比

由表 2 所示,各 ESD 作用过的 SCB 其点火时间随着电压的降低而增加,这是因为随着电压的降低,加载到桥膜上面的能量逐渐变小,桥膜达到气化所用的时间就会变长。结果显示,经过 ESD 作用的桥比未经过 ESD 作用的桥发火时间长,并且作用在 SCB 上的静电

电压越大,其点火时间越长。ESD 后 SCB 的电阻阻值稍有增大,点火时间会相应变长。

4.2.4 电流峰值以及电流峰值对应时间的对比

由表 2 可以看出,随着点火电压的增大,电流峰值逐渐减小。电流峰值对应的时间反映了 SCB 对点火脉冲的响应敏感程度,由表 2 可以看到,经受了 ESD 作用的桥比未静电作用的桥其点火时电流峰值对应的时间长,并且随着 ESD 电压增大,其电流峰值对应的时间也越长。这说明:静电对 SCB 的点火敏感性产生了影响,导致 SCB 对脉冲刺激的瞬发度下降。

4.2.5 t 检验

经受不同 ESD 电压(20 kV、21 kV、22 kV、23 kV、26 kV)的 SCB 分别在各自的全发火电压下重复点火 10 发,计算其点火能量和点火时间,并采用下述公式进行 t 检验:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$$

其中, \bar{X} 为样本平均数, μ_0 为系统平均数(即未 ESD 的桥), S 为标准差,是方差的算术平方根。

$$S^2 = 1/(n-1)[(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2]$$

$$\text{拒绝域为: } \{ |t| \geq t_{\alpha/2}(n-1) \}$$

本实验中 $n = 10$,

$$\text{故拒绝域: } |t| \geq t_{0.025}(9) = 2.2622$$

表 3 静电作用后 SCB 点火能量的 t 检验

Table 3 Ignition energy of SCB with ESD by t-test

ESD/kV	0	20	21	22	23	26
1 [#]	808.947	819.986	812.77	775.202	750.686	656.144
2 [#]	816.392	814.289	798.663	762.337	747.275	680.259
3 [#]	796.598	813.122	802.871	761.401	736.211	685.006
4 [#]	823.155	808.261	828.365	789.181	750.940	697.858
5 [#]	827.062	829.101	822.459	790.004	723.929	695.263
6 [#]	828.611	815.787	825.274	777.873	730.621	700.045
7 [#]	825.458	811.751	810.948	769.981	734.049	693.524
8 [#]	809.265	817.611	806.681	785.641	729.584	652.148
9 [#]	821.684	818.816	799.118	771.259	749.681	668.597
10 [#]	824.147	817.948	805.371	768.525	725.610	700.213
average	818.032	815.950	811.252	775.140	737.859	682.906
variance		43.191	103.755	191.958	136.363	291.491
standard deviation		6.572	10.186	13.855	11.677	17.073
t		1.002	2.105	9.798	21.711	25.028

表 4 静电作用后 SCB 点火时间的 t 检验

Table 4 Ignition time of SCB with ESD by t -test

ESD/kV	0	20	21	22	23	26
1#	70.13	67.04	74.48	76.64	85.4	80.37
2#	71.63	69.78	74.67	74.66	62.58	76.06
3#	68.97	71.59	75.84	75.14	86.58	89.58
4#	60.34	67.35	68.82	74.15	80.56	79.44
5#	66.72	64.98	70.16	76.31	79.59	86.16
6#	70.69	68.63	69.25	74.89	83.59	83.15
7#	70.99	70.24	72.19	75.08	81.94	81.25
8#	66.89	67.02	73.18	74.91	79.92	83.57
9#	68.54	72.28	69.25	74.65	82.68	83.92
10#	66.82	67.27	74.68	74.46	87.62	87.18
average	68.17	68.62	72.25	75.09	81.05	83.07
variance		52.18	56.27	31.71	147.47	120.69
standard deviation		7.22	7.50	5.63	12.14	10.99
t		0.197	1.720	3.886	3.354	4.289

由表 3 可知：当 ESD 电压 ≤ 21 kV 时， $|t| < 2.2622$ ，不在拒绝域中，不存在显著性差异；反之，ESD > 21 kV 时， $|t| > 2.2622$ ，在拒绝域中，有着显著性差异。

同样由表 4 可知：当 ESD ≤ 21 kV 时， $|t| < 2.2622$ ，不存在显著性差异；反之，ESD > 21 kV 时， $|t| > 2.2622$ ，有着显著性差异。

实验结果说明：ESD 会影响 SCB 火工品的发火性能，发火时间和发火能量都明显减小。ESD 实验后，SCB 的发火敏感度提高，安全性下降。故可以将 21 kV 作为 SCB (1 Ω) 承受 ESD 并导致其性能发生明显改变的阈值。

5 结论

(1) ESD 会引起 SCB 桥膜损伤，且经过 21 kV 以上的 ESD 作用后桥区面积有显著烧蚀现象，随着 ESD 电压升高，烧蚀面积增大。

(2) 进行 D-最优化实验，可知：ESD 电压越大，SCB 点火所需的全发火电压越小，且都小于未静电作用桥的全发火电压，可见静电作用增强了桥的感度。

(3) 在全发火电压下进行点火，得到：经受的 ESD 电压越大，SCB 的点火能量越低，且均小于未经受 ESD 桥的点火能量，故 ESD 使桥变得敏感；且随着 ESD 电压的增大，SCB 电流峰值对应的时间逐渐增大，说明：经过静电作用以后，SCB 对电流脉冲的可靠点火能力下降。

(4) 对点火能量和时间进行 t 检验，得到：21 kV 可以作为判断 SCB 承受 ESD 且导致其性能发生明显

改变的阈值。当电压大于 21 kV 时，ESD 对桥作用明显；小于 21 kV 时，ESD 基本不影响桥的性能，这个结果为研究 SCB 的静电防护措施奠定了基础。

参考文献：

- [1] Kim J, Navn K S, Jungling K C. Plasm electron density generated by a semiconductor bridge as function of input energy and land-material [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 44 (6): 1022 - 1026.
- [2] Jongdae Kim, Tae Moon Roh, Kyoung-ik Cho, et al. Optical characteristics of silicon semiconductor bridge under high current density conditions [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(5): 852 - 857.
- [3] 卢斌, 洪志敏, 任小明, 等. SCB 换能元应用于微型固体推进器中的研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(2): 305 - 307.
LU Bin, HONG Zhi-min, REN Xiao-ming, et al. Research on SCB energy-exchange device in micro solid propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 305 - 307.
- [4] Thomas A, Baginski R F. Characterization of the semiconductor junction igniter in the 2.75 folding fin aircraft rocket [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1995, 37(1): 80 - 84.
- [5] Ewick David W, Walsh Brendan M. Optimization of the bridge powder interface for a low energy SCB device. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 97-2831 [R], 1997.
- [6] Craig J Boucher, David B Novotney. Next generation semiconductor bridge initiators. *AIAA 2000-3731* [R], 2001.
- [7] 穆丽军, 高俊国, 张玉令. 静电放电对电火工品作用机理分析与试验研究 [J]. *工业安全与环保*, 2010, 36(5): 39 - 40.
MU Li-jun, GAO Jun-guo, ZHANG Yu-ling. Effect mechanism analysis and test investigation of electrostatic stimulus on electric explosive devices [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2010, 36(5): 39 - 40.
- [8] 常悦, 高聪杰, 陈志文, 等. 电火工品电磁脉冲危害检测及评估方法研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(5): 183 - 185.
CHANG Yue, GAO Cong-jie, CHEN Zhi-wen, et al. Research on the measurement and evaluation method of EED' electromagnetic-

- ism impulse harm[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2007, 27(5): 183–185.
- [9] Prinse W C, Bouma R H B, Griffiths T T, et al. Constant current testing of a semiconducting bridge initiator [C] // 51st Annual Fuze Conference, Nashville, TN. 2007.
- [10] 马鹏, 朱顺官, 徐大伟, 等. 叠氮化铅半导体桥点火研究[J]. *火工品*, 2010, 2(1): 10–13.
MA Peng, ZHU Shun-guan, XU Da-wei, et al. Study on the ignition character of lead azide by semiconductor bridge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010, 2(1): 10–13
- [11] 张文超, 王文, 周彬, 等. 半导体桥生成等离子体温度的测量[J]. *含能材料*, 2009, 3(17): 344–348.
ZHANG Wen-chao, WANG Wen, ZHOU Bin, et al. Measurement of semiconductor bridge plasma temperature under different capacitances using spectroscopic method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 3(17): 344–348.
- [12] 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(4): 22–25.
ZHU Feng-chun, QIN Zhi-chun, CHEN Xi-wu, et al. Design and analyze of the semiconductor bridge[J]. *Explosive Materials*, 2004, 33(4): 22–25.
- [13] 徐禄. 半导体桥点火药剂的敏化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
XU Lu. The research about ignition sensitization of reagent in semiconductor bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.

Ignition Characteristics of Non-electrostatic Discharge and Electrostatic Discharge on Semiconductor Bridge

GUO Xiao-rong, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, MA Peng, CHEN Fei, WANG Da-wei

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: D-optimal method was employed in the experiments of semiconductor bridge (SCB) ignition. The SCB with and without electrostatic discharge (ESD) were used to ignite lead styphnate (LTNR). The ignition voltage, current and time were obtained by oscillograph, and the deck ablation area of SCB was measured by microscope. It was found the ESD could do some damage on SCB, and the higher ESD, the greater deck ablation area is. Compared with the non-ESD SCB, the ignition voltage and energy of ESD SCB were lower, which means that the ESD SCB was more sensitive. The ignition energy and ignition time were measured by *t*-test, which showed that the ESD of 21 kV was the critical point. With higher than 21 kV, ESD had greater effect on SCB, and the lower, the less.

Key words: military chemistry and pyrotechnics; semiconductor bridge; electrostatic discharge; ablation area; capacitor discharge; *t*-test

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.01.024