

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.006

肖特基二极管防护后 SCB 静电安全性研究^{*}

黄亦斌 周 彬 王 军
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了提高半导体桥(SCB)火工品的静电安全性能,利用肖特基二极管(SBD)对 SCB 进行静电防护,对防护后的 SCB 火工品进行静电放电试验研究。研究表明:在静电放电条件(25 kV、500 pF、500 Ω)下,防护后的 SCB 火工品的桥区未烧蚀,电阻未发生明显变化,SCB 未损伤。对静电试验后的 SCB 火工品进行电容发火试验研究,研究表明:静电试验后的 SCB 能够正常发火,SCB 的爆发时间与发火能量未产生显著性变化,SCB 的电爆性能未受到影响。

[关键词] 半导体桥;肖特基二极管;静电安全性

[分类号] TJ450; TD235.2⁺2

Research on the Electrostatic Security of SCB with Schottky Barrier Diodes

HUANG Yibin, ZHOU Bin, WANG Jun
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to improve static safety performance of SCB igniters, Schottky Diodes were used to protect SCB from electrostatic discharge. Results of the electrostatic discharge experiment show that the bridge area has not been ablated, the resistance has not changed significantly, and the SCB has not been damaged under electrostatic discharge conditions of 25kV, 500pF and 500Ω. The results of the capacitive discharge experiment show that the SCB can ignite normally after the electrostatic experiment. In addition, ignition time and energy of SCB do not change significantly, and the electrical explosion performance of SCB is not affected.

[KEYWORDS] semiconductor bridge; Schottky barrier diodes; electrostatic security

引言

半导体桥(semiconductor bridge,简称 SCB)火工品是以半导体膜做点火装置,用于引爆含能材料的电火工品^[1-3]。SCB 火工品具有作用迅速、安全性高、可靠性高等优点,在武器系统中应用越来越广泛。随着科技的不断进步,军事技术的不断发展,各种大功率无线电设备与电磁武器的大量使用使得电磁环境愈发恶劣。火工品作为武器系统的首发元件,具有功能首发性、作用敏感性等特点,是武器系统中最为敏感的元件。在恶劣的电磁环境下,火工品的安全性将会急剧下降,可能会误触发,引起意外事故,造成设备的损坏以及人员的伤亡^[4]。

早在 1934 年,国内外的研究者们就开始研究静

电放电对电火工品造成的危害,并且采用设计泄放通道、增加绝缘环、并联 TVS 二极管^[5]、并联压敏电阻^[6-7]、并联激光二极管^[8]等进行静电防护,以提高 SCB 火工品的静电安全性能。虽然上述方法具有一定的静电防护能力,但是并联上述防护器件后火工品的体积较大,无法满足火工品小型化的需求。肖特基二极管^[9](Schottky barrier diode,简称 SBD)是多数载流子为主要运动方式的半导体器件,具有正向导通电压较低(仅为 0.4 V 左右)、反向恢复时间较短(仅为纳秒量级)等明显优势。此外,SBD 芯片的体积较小,并且后续能够集成到 SCB 芯片上,在提高火工品静电安全性能的同时,也能够满足火工品小型化、集成化的需求。

本文中,主要在美军标静电放电条件(25 kV、500 pF、500 Ω)下,并联SBD对SCB火工品进行静电

^{*} 收稿日期:2019-01-08
第一作者:黄亦斌(1994 -),男,硕士研究生,主要从事半导体桥点火研究。E-mail:hybnjust@126.com
通信作者:周彬(1971 -),女,博士,副研究员,主要从事半导体桥火工品研究。E-mail:zhoubinnust@126.com

防护,研究防护后 SCB 火工品的抗静电性能。

1 试验样品

选用图 1 所示的贴片式 SBD 对 SCB 火工品进行静电防护,该芯片的尺寸为 $2.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,击穿电压在 12 V 左右,具有响应快、反向恢复时间短、体积小等优点。将 SBD 与 SCB 火工品并联,当电路受到静电放电作用时,如果静电电压超过 SBD 的击穿电压,SBD 在瞬间被击穿,由原来的高阻抗变成低阻抗,此时静电放电的电流大部分都流经 SBD,形成了对 SCB 的静电防护。此外,SBD 的恢复时间较短,当加载在 SBD 上的电压低于其击穿电压时,SBD 迅速恢复到高阻抗状态,能够多次耐受静电能量的冲击。

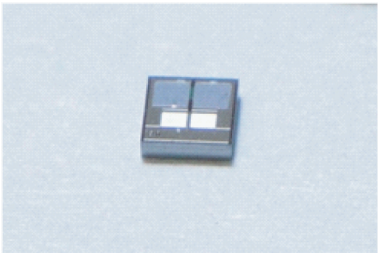


图 1 SBD 芯片的外观

Fig. 1 Appearance of Schottky Diodes used in the test

SCB 的尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}(L) \times 380\text{ }\mu\text{m}(W) \times 2\text{ }\mu\text{m}(T)$,封装后的 SCB 火工品的电阻约为 $1\text{ }\Omega$,发火能量约为 0.5 mJ 。如图 2 所示,将 SBD 芯片贴在陶瓷塞下方,通过导电胶与脚线相连。在 SCB 芯片表面涂装上点火药斯蒂芬酸铅 ($\text{C}_6\text{HN}_3\text{O}_8\text{Pb}$, LTNR),装药质量为 2 mg ,使 LTNR 均匀覆盖在芯片表面。

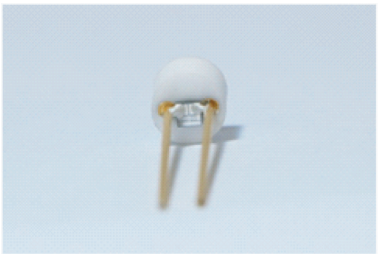


图 2 并联 SBD 的 SCB 外观

Fig. 2 Appearance of SCB parallel to Schottky Diodes

2 试验原理及装置

主要采用充电电容 500 pF 、串联电阻 $500\text{ }\Omega$ 的静电放电回路进行静电放电试验。静电试验的电路

如图 3 所示,其中 C 为充电电容,电容大小为 500 pF , R_1 为充电线路中的电阻, R_2 为串联的无感电阻,电阻为 $500\text{ }\Omega$ 。

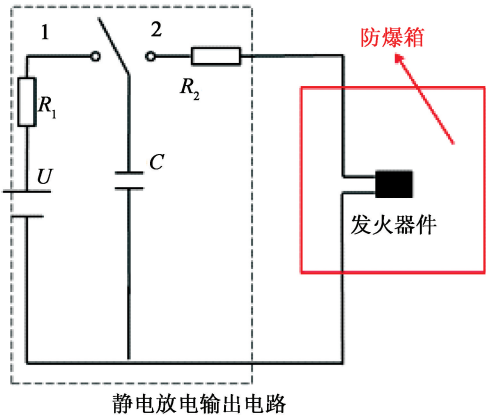


图 3 静电放电试验电路

Fig. 3 Schematic of ESD test

试验装置采用 JGY-50Ⅲ 静电感度测试仪、QK-3 型开关箱、CH85 型储能高压薄膜电容、TK-60 型数字高压表,试验在电压 25 kV 、电容 500 pF 、串联电阻 $500\text{ }\Omega$ 条件下进行,加载的方式为脚-脚间放电。

3 试验结果与讨论

3.1 静电试验结果

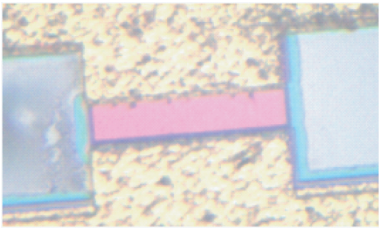
在电压 25 kV 、电容 500 pF 、串联电阻 $500\text{ }\Omega$ 试验条件下,对未经防护的 SCB 火工品进行静电放电试验,结果如表 1 所示。

表 1 25 kV、500 pF、500 Ω 条件下 SCB 裸桥静电试验数据

Tab. 1 ESD results of SCB under the condition of 25kV, 500pF and 500Ω

样品	试验前电阻 R/Ω	试验后电阻 R'/Ω	是否 烧蚀
M1	1. 11	2. 15	是
M2	1. 08	2. 86	是
M3	1. 18	2. 29	是

试验结果表明,在 25 kV 、 500 pF 、 $500\text{ }\Omega$ 的条件下,3 发 SCB 样品全部烧蚀,SCB 试验前、后的电阻发生了明显的变化。为了进一步观察静电放电试验前、后 SCB 桥区的变化,通过显微镜拍摄试验前、后 SCB 桥区的照片,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在美军标 (25 kV 、 500 pF 、 $500\text{ }\Omega$) 条件下,SCB 桥区表面已经完全烧蚀,静电能量对 SCB 的性能造成了较大的影响,SCB 损伤。



(a) 静电试验前



(b) 静电试验后

图 4 未经防护 SCB 静电试验前、后桥区的外观

Fig. 4 Appearance of SCB before and after the electrostatic test

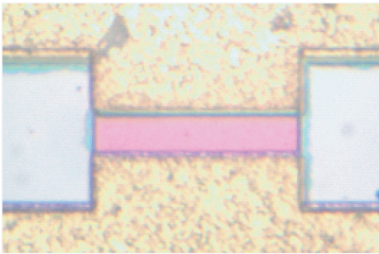
为了提高 SCB 的静电安全性能,利用 SBD 对其进行防护,所得试验结果如表 2 所示,通过显微镜拍摄试验前、后 SCB 桥区的照片,桥区对比的照片如图 5 所示。

根据 SBD 防护后静电试验的结果可知,在美军标(25 kV,500 pF,500 Ω)条件下,5 发 SCB 样品均未烧蚀。对静电试验前、后 SCB 电阻值变化进行 t 检验(水平区 $\alpha=0.05, n_1=5, n_2=5$,通过查表可知 $t_{1-\alpha/2}\{n_1+n_2-2\}=2.306$),得到的结果如表 3 所示。从表 3 中的 t 检验结果可知,静电试验前、后,SCB 的电阻值未发生显著性变化。对比表 1 中的数据,经过 SBD 防护后 SCB 的桥区未烧蚀,在(25 kV、500 pF,500 Ω)条件的静电能量冲击下,SCB 没有受到损伤,性能没有产生变化,而未经防护的 SCB 桥区表面已经完全烧蚀,性能发生明显变化,因此,SBD 能够很好地实现对 SCB 的静电防护。

SBD 具有电压钳制的功能,SBD 在静电作用的过程中被击穿,将电压钳制在一个较低的水平,抑制

表 2 SBD 防护后 SCB 静电试验数据

Tab. 2 ESD results of SCB with Schottky Diodes			
样品	试验前电阻 R/Ω	试验后电阻 R'/Ω	是否烧蚀
S1	1.03	0.93	否
S2	1.12	1.13	否
S3	1.03	0.90	否
S4	1.03	0.98	否
S5	1.08	0.97	否



(a) 静电试验前



(b) 静电试验后

图 5 SBD 防护后 SCB 静电试验前、后桥区的外观

Fig. 5 Appearance of SCB with Schottky Diodes before and after the test

表 3 静电试验 t 检验结果

Tab. 3 T-test results of ESD experiments

比较项	t 检验	是否有显著性差异
静电试验前、后电阻变化情况	$1.713 < 2.306$	否

静电电压的上升。SBD 被击穿后处于低阻抗状态,此时大量电流通过 SBD,SBD 分走大部分的静电能量,对 SCB 形成防护。

3.2 静电对 SCB 电爆性能的影响

静电作用后 SCB 火工品的发火性能是否受到影响需要进一步研究。通过电容放电发火试验,研究经 SBD 防护的 SCB 火工品在静电作用后,发火性能是否产生明显变化。

试验仪器:ALG-CN1 储能放电起爆仪,军用钽电容,高速数字存储示波器。试验条件:充电电容 22 μF,放电电压 16 V。通过 Origin 软件处理示波器采集到的数据,可以得到图 6 所示的 SCB 电容发火特性电参数曲线。图 6 中,SCB 电压曲线的第二个特征峰对应的时间为 SCB 的爆发时间,对应的能量为 SCB 的发火能量,分析整理电容发火试验的数据,其结果如表 4 所示。

将表 4 中两种样品的爆发时间、发火能量进行 t 检验(水平区 $\alpha=0.05, n_1=5, n_2=5$,通过查表可知 $t_{1-\alpha/2}\{n_1+n_2-2\}=2.306$),比较静电作用前、后

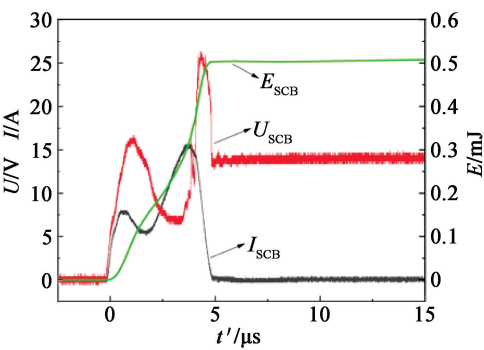


图 6 SCB 电容发火特性电参数随时间的变化
Fig.6 Electrical parameters of SCB capacitor
ignition characteristic changing with time

表 4 电容放电发火试验数据

Tab.4 Ignition results under capacitive
discharge conditions

样品类型	样本 发数	平均爆发 时间 $\bar{t'}/\mu\text{s}$	平均发火 能量 \bar{E}/mJ
未经静电 作用的 SCB	5	5.21	0.52
SBD 防护后经 静电作用的 SCB	5	4.88	0.46

SCB 火工品的发火性能是否有显著性差异,结果如表 5 所示。

表 5 发火试验 t 检验结果

Tab.5 t -test results of ignition experiments

比较项	t 检验	是否有显著性差异
爆发时间 t'	$0.991 < 2.306$	否
发火能量 E	$1.628 < 2.306$	否

从表 4 与表 5 中可以看出,并联 SBD 防护后的 SCB 在静电作用后,爆发时间与发火能量略有减小,但 t 检验结果显示,其爆发时间与发火能量与未经过静电试验的样品相比无显著性差异,说明静电试验对其发火性能无显著性影响,同时说明 SBD 对 SCB 火工品的发火性能没有影响,而且静电防护作用明显。

4 结论

在 SCB 火工品的基础上,提出使用 SBD 对其进行静电防护,在 25 kV、500 pF、500 Ω 静电放电条件下研究其静电防护效果,得到的结论如下:1) 未经防护的 SCB 桥区全部烧蚀,电阻发生明显变化,SCB 受到损伤。2)SBD 防护后的 SCB 桥区未烧蚀,静电

试验前、后的电阻未发生显著性变化,SCB 未损伤。
3)对静电试验后的 SCB 进行电容发火试验,爆发时间与发火能量无显著性变化,SCB 的电爆性能未受到影响。
综上,SBD 能够有效地实现对 SCB 火工品的静电防护,且不会影响 SCB 的发火性能。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 徐振相, 周彬, 秦志春, 等. 微电子火工品的发展及应用[J]. 爆破器材, 2004, 33(增刊): 29-34.
XU Z X, ZHOU B, QIN Z C, et al. Development and application of the micro-electric detonator [J]. Explosive Materials, 2004, 33(Suppl.): 29-34.

[3] BAGINSKI A T. Electroexplosive device: US 5085146 [P]. 1990-05-17.

[4] NOVOTNEY D B, WELCH B M, EVICK D W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity: AIAA99-2417[R]. 1999.

[5] 周彬, 王林狮, 秦志春, 等. 一种半导体桥火工品抗静电技术[J]. 火工品, 2010 (2): 5-7.
ZHOU B, WANG L S, QIN Z C, et al. A method of anti-electrostatic discharge for semiconductor bridge initiators [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010 (2): 5-7.

[6] 陈飞, 周彬, 秦志春, 等. 半导体桥火工品的防静电和防射频技术[J]. 爆破器材, 2010, 39(3): 28-32.
CHEN F, ZHOU B, QIN Z C, et al. Anti-electrostatic and anti-RF technology of semiconductor bridge explosive devices[J]. Explosive Materials, 2010, 39(3): 28-32.

[7] 左成林. SCB 火工品静电防护理论模拟及实验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
ZUO C L. Research on the ESD protection theoretical simulation and experimental of semiconductor bridge initiators [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technolgoy, 2016.

[8] SALAS F J, SANCHEZ D H, WEINLEIN J H. Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator: SAND 2003-2100 [R]. Albuquerque, New Mexico, US: Sandia National Laboratories, 2003.

[9] 袁博. SiC 肖特基二极管模拟研究[D]. 西安:西安工业大学, 2013.
YUAN B. Analysis and simulation of SiC Schottky barrier diodes [D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2013.