

文章编号:1006-9941(2025)01-0073-09

平面集成 TVS 二极管对半导体桥火工品换能元性能的影响因素

陶禹任,王磊,周彬,王军

(南京理工大学化学与化工学院,江苏南京 210094)

摘要: 为探究平面集成瞬态抑制二极管(TVS)对半导体桥(SCB)火工品换能元性能的影响因素以及规律,通过电容放电发火实验,研究了平面集成 TVS 二极管的并联数量与击穿电压对半导体桥火工品换能元的电爆性能的影响,并通过 500 pF/500 Ω /25 kV 静电放电实验,研究了其对半导体桥火工品换能元的静电可靠性能的影响。结果表明,当激励能量使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近上限时,增加平面集成 TVS 二极管并联数量会延长 SCB 火工品换能元的爆发时间,影响 SCB 火工品换能元正常爆发,反之,若激励能量不足以使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近其上限,则 SCB 火工品换能元爆发性能不会随并联平面集成 TVS 二极管的数量变化而变化;当激励电压大于平面集成 TVS 二极管的击穿电压时,TVS 二极管击穿电压越低,SCB 火工品换能元的爆发时间越长,爆发能量越大,甚至影响 SCB 火工品换能元正常爆发;降低平面集成 TVS 二极管的击穿电压、增加并联数量都能够提高 SCB 火工品换能元的静电可靠性能;设计桥区尺寸为 350 μm (W) \times 100 μm (L) \times 2 μm (H)的抗静电集成半导体桥芯片时可以集成两个击穿电压略低于 14 V 或一个击穿电压略高于 7 V 的 TVS 二极管。

关键词: 抗静电集成半导体桥芯片;火工品;TVS 二极管;电爆性能

中图分类号: TJ5;TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024112

0 引言

半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)火工品是一种用半导体膜或金属-半导体膜作为换能元引爆含能材料的逻辑控制功能的电火工品^[1]。与传统的桥丝式电火工品相比,SCB 火工品发火能量低,安全性高,瞬发性好,成本低^[2],传统的半导体桥火工品本身具有一定的静电安全性,脚-脚间静电放电时,能在 500 pF/5000 Ω /25 kV 的条件下不产生静电损伤^[3],被广泛应用。但是随着武器系统的发展,日趋复杂的电磁环境^[4-5]对 SCB 火工品的抗静电能力提出了更高的要求:在 500 pF/500 Ω /25 kV 脚-脚间静电放电条件下,SCB 火工品的桥区不能损坏。通常而言,通过“泄放”可提高电火工品“脚-脚”间抗静电的能力,主要方式是通过增加静电泄放元件,提高其“脚-脚”抗静

电能力,对此,相关学者开展了大量工作。研究发现增加静电泄放元件,如齐纳二极管^[6]、瞬态抑制二极管^[7]、压敏电阻^[8]等,能有效提高 SCB“脚-脚”间的静电防护能力。选用静电泄放元件对 SCB 火工品进行静电加固时需要满足 2 个要求^[9]:(1)静电泄放元件要切实有效地提高 SCB 火工品的静电防护能力,即提高 SCB 火工品的静电安全性和可靠性。安全性是指静电作用引起的火工品意外发火,可靠性是由静电作用引起的火工品桥区损伤、药剂性能改变、发火感度改变等现象;(2)静电泄放元件的使用不能影响 SCB 火工品的电爆性能,主要为 SCB 火工品的爆发时间和爆发能量,SCB 火工品爆发时电压曲线呈双峰结构,一般将半导体桥电压信号的起始点到电压曲线第二个峰值处定义为半导体桥的爆发时间,将爆发时间内电压电流乘积的积分定义为爆发能量。静电泄放元件通常是外挂焊接在 SCB 火工品上,这不仅会降低火工品与泄放元件之间连接的可靠性,还会导致 SCB 火工品的体积增大,违背 SCB 火工品小型化的发展趋势,因此,抗静电集成半导体桥火工品成为 SCB 火工品研究的新趋势。抗静电集成半导体桥火工品芯片是集成半导体桥火工品的

收稿日期:2024-04-25;修回日期:2024-06-07

网络出版日期:2024-08-23

作者简介:陶禹任(2000-),男,硕士研究生,主要从事抗电磁集成半导体桥火工品研究。e-mail:122103010394@njjust.edu.cn

通信联系人:周彬(1971-),女,副研究员,主要从事钝感电火工品设计研究。e-mail:11995039@njjust.edu.cn

引用本文:陶禹任,王磊,周彬,等.平面集成 TVS 二极管对半导体桥火工品换能元性能的影响因素[J].含能材料,2025,33(1):73-81.

TAO Yu-ren, WANG Lei, ZHOU Bin, et al. Impact Factors of Planar Integrated TVS diodes on the Performance of Semiconductor Bridge Initiator Transducers[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(1):73-81.

核心,它是将具备静电防护能力的元件与火工品换能元通过微电子加工技术将二者集成在毫米级芯片上,使芯片既具备静电防护能力又能满足点火起爆系统对火工品高安全性和小型化的要求。平面集成瞬态抑制二极管(TVS)是较理想的用于抗静电集成的元件,其制造工艺与芯片的CMOS工艺兼容,可直接集成在芯片上,并且与其他静电泄放元件相比,具有更快的响应时间(亚纳秒级)和更高的浪涌吸收能力。

TVS二极管作为抗静电集成半导体桥火工品的抗静电集成元件时,同样需要满足SCB火工品对静电泄放元件的要求,TVS二极管的击穿电压与TVS二极管的数量都会对抗静电集成半导体桥火工品的电爆性能和静电可靠性能产生影响,研究抗静电集成芯片上平面集成TVS二极管的并联个数和击穿电压的影响规律是优化抗静电集成半导体桥火工品研究的重要一步。近年来,国内外学者^[10-11]基于仿真模拟和试验结合对作为分立元件的TVS二极管的击穿电压对SCB火工品的电爆性能和静电安全性能的影响规律进行了研究,但少有集成芯片上TVS二极管并联个数与击穿电压对SCB火工品性能的影响规律研究。

为此,本研究采用尺寸为 $350\ \mu\text{m}(W)\times 100\ \mu\text{m}(L)\times 2\ \mu\text{m}(H)$ 的矩形桥SCB火工品与2种抗静电集成SCB芯片上的TVS二极管,基于 $47\ \mu\text{F}$ 电容放电发火实验,研究了在不同充电电压下平面集成TVS二极管并联个数以及击穿电压对半导体桥火工品换能元的爆发性能

的影响,并通过静电放电实验研究了平面集成TVS二极管并联个数以及击穿电压对半导体桥火工品换能元的静电可靠性能的影响。

1 实验部分

1.1 样品的制备

实验所用抗静电集成SCB芯片上,平面集成TVS二极管被设计为左右击穿电压不对等,因而,电流方向不同所得结果也会不同。将抗静电集成芯片装配在陶瓷塞中,SCB桥区导通,键合后无法通过陶瓷塞脚线确定TVS二极管的左右击穿电压,容易产生错误的实验结果,并且无法测量平面集成TVS二极管的分流。因此,综合考虑以上问题的同时,使试验样品更贴近抗静电集成半导体桥火工品的状态,研究将平面集成TVS二极管封装在印制电路板(PCB)上,再通过导线将其与SCB火工品并联。实验所用SCB芯片结构如图1a所示,其中桥区尺寸为 $350\ \mu\text{m}(W)\times 100\ \mu\text{m}(L)\times 2\ \mu\text{m}(H)$ 、桥电阻约 $1\ \Omega$ 左右,形状为矩形。实验前,通过环氧胶将其固化在陶瓷塞底部,通过超声键合,利用键合丝将芯片两极与陶瓷塞的脚线相连,再使用导电胶包覆键合丝以保护键合丝、防止其被腐蚀或因外力作用而断裂。图1b为封装后的SCB火工品图。

1.2 瞬态抑制二极管

图2a为抗静电集成芯片及其2个平面集成TVS

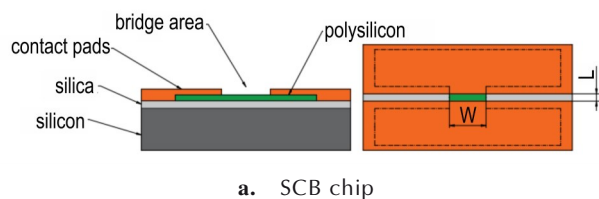


图1 半导体桥芯片结构及封装示意图

Fig.1 Structure of SCB chip and its packaging schematic

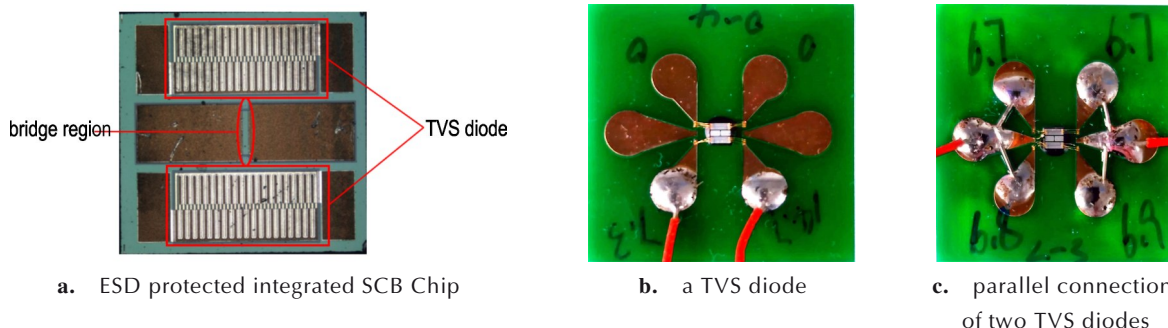


图2 抗静电集成半导体桥芯片及平面TVS二极管结构与连接图

Fig.2 Structure and connection diagram of electrostatic discharge (ESD) protected integrated SCB chip and planar TVS diode

二极管的结构图。研究将抗静电集成芯片用环氧胶固化在蝴蝶型 PCB 板上,再通过键合金属丝将平面集成 TVS 二极管的两极与蝴蝶型 PCB 板的电极相连,若只通过导线引出蝴蝶型 PCB 板的上下电极中的一对,则接入一个平面集成 TVS 二极管(图 2b);若将蝴蝶型 PCB 板的上下电极通过金属线连接在中间电极,再通过导线引出,则接入两个并联连接的平面集成 TVS 二极管(图 2c)。抗静电集成半导体桥火工品芯片上的平面集成 TVS 二极管的参数如表 1 所示。

为了方便后续表述,根据并联平面集成 TVS 二极管的击穿电压大小以及数量,将无防护 SCB 火工品以及并联不同型号平面集成 TVS 二极管的 SCB 火工品样品分为表 2 所述类型。平面集成 TVS 二极管与 SCB 火工品并联等效电路图如图 3 所示。

1.3 电容发火实验

电容放电发火电路的原理图如图 4 所示,该测试系统由 ALG-CN1 型储能电容放电仪、47 μF 固体钽电

表 1 平面 TVS 二极管参数

Table 1 Parameters of planar TVS diode

| code name | size / μm | breakdown voltage / V |
|-----------|----------------------|-----------------------|
| AT7 | 1200×600 | 6.7-7.3 |
| AT14 | | 13.9-15.1 |

表 2 样品类型

Table 2 Sample types

| identification number | sample status |
|-----------------------|--|
| S | unprotected Lr-type SCB initiators |
| S77 | parallel an Lr-type SCB initiator with two AT7 TVS diodes |
| S7 | parallel an Lr-type SCB initiator with an AT7 TVS diode |
| S14 | parallel an Lr-type SCB initiator with an AT14 TVS diode |
| S1414 | parallel an Lr-type SCB initiator with two AT14 TVS diodes |

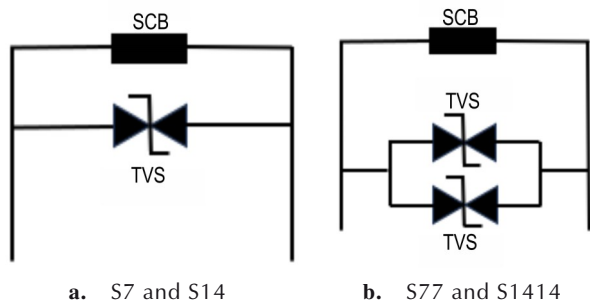


图 3 TVS 二极管与 SCB 火工品并联等效电路图
Fig.3 Circuit diagram of the equivalent parallel connection of TVS diode and SCB initiator device

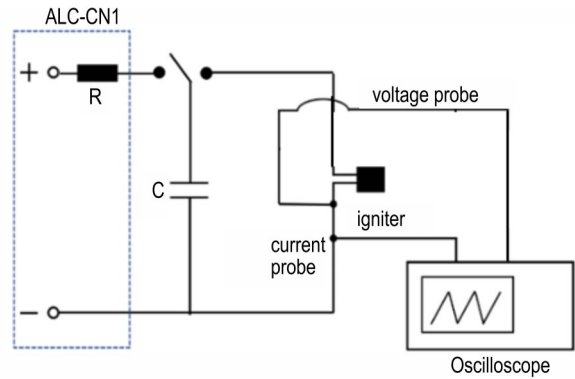


图 4 电容发火电路图
Fig.4 Schematic diagram of the capacitor discharge unit

容、电压探头、电流探头和瞬态数字示波器(LeCroy604Zi)组成。所用 SCB 火工品在 47 μF 电容作用下临界发火电压为 13.7 V,平面集成 TVS 二极管的最大击穿电压为 15.1 V,为确保 SCB 火工品正常爆发以及 TVS 二极管被击穿产生分流,分别在充电电压 15、18、21、24 V 条件下测试各型号样品的电爆特性,平行实验不小于 3 次。实验时,由 ALG-CN1 型储能电容放电仪对 47 μF 固体钽电容充电至设定电压,之后通过转换开关使电容与 SCB 火工品组成一个放电回路,由钽电容向 SCB 火工品释放能量,同时示波器记录 SCB 火工品电爆时的电压、电流曲线以及 TVS 二极管的分流曲线。

1.4 静电放电实验

静电放电电路原理图如图 5 所示^[12],该电路由 JGY-50III 型感度测试仪、QK-3 型高压开关箱、CH-85 型耐高压储能电容 C 和无感放电阻 R_2 组成。

在 500 pF/500 Ω /25 kV 的条件下根据国军标 GJB5309.14^[13]《火工品静电放电试验》的试验方法开展对各型号样品的静电放电试验。

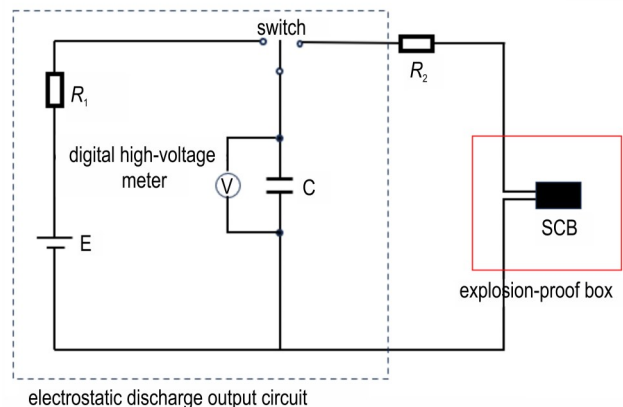


图 5 静电放电电路图
Fig.5 Diagram of electrostatic discharge circuit

2 结果与讨论

2.1 爆发性能的影响因素研究

为研究平面集成TVS二极管并联个数与击穿电压对SCB火工品换能元爆发性能的影响,通过测试不同充电电压下SCB火工品换能元的电爆曲线,分析SCB火工品换能元爆发时间和爆发能量的变化,继而获得平面集成TVS二极管并联个数以及击穿电压对SCB火工品换能元爆发性能的影响。

2.1.1 并联个数的影响

S型、S7型以及S77型样品的 $U-t$ 曲线和 $I-t$ 曲线如

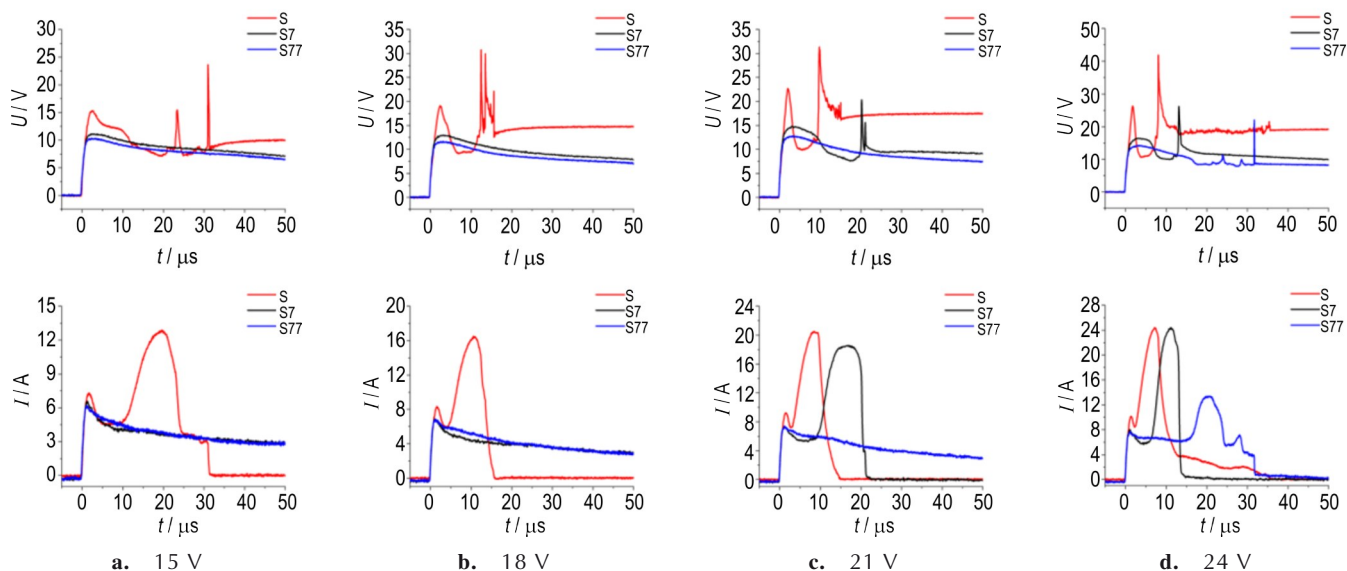


图6 S、S7和S77型样品的电爆曲线

Fig.6 Electrical explosion curves of S, S7 and S77 samples

S型、S7型以及S77型样品在不同激励能量下的平均爆发时间和平均爆发能量如表3所示。由各型号样品电爆曲线及表3可见,电容充电电压不大于18V时,SCB火工品换能元爆发性能不随TVS二极管并联个数的变化而变化,当电容充电电压不小于21V时,SCB火工品换能元的爆发时间随TVS二极管并联个数的增加而增大。

进一步研究引起上述现象的原因,对TVS二极管支路吸收的能量进行了计算,结果如图7所示。由图7可知,当电容充电电压为15V、18V时,两个AT7型TVS二极管吸收的能量 E_{T7} 与一个AT7型TVS二极管吸收的能量 E_T 间的差值很小,约为0.1mJ(图7a~b),当电容充电电压为21V、24V时, E_{T7} 大于 E_T ,最大差值可达1.0mJ(图7c~d)。由此可知,激励能量高于一

图6所示。由图6a和6b可以看出,当充电电压不大于18V时,S7和S77型样品的电爆曲线均没有出现双峰且基本重合,分析认为未出现双峰是因为AT7型TVS二极管击穿电压较低,在第一个电压峰附近被击穿,分走部分电流,导致了SCB火工品换能元上的能量不足以使其正常爆发,电爆曲线基本重合则说明S7和S77样品爆发性能相同。

由图6c和图6d可以看出,当充电电压为21V时,S7型样品电爆曲线具有双峰结构正常爆发,而S77型样品电爆曲线仍为单峰,当充电电压为24V时,S7和S77样品的电爆曲线都具有双峰结构,但S7样品爆发时间短于S77样品的爆发时间。

定值时会造成两个TVS二极管吸收的能量大于一个TVS二极管吸收的能量,从而导致SCB火工品爆发性能受TVS二极管并联个数的影响。

分析认为这是由于TVS二极管被击穿时,TVS二极管会通过调节分流将电压维持在一个相对稳定的水平,该特性只与TVS二极管本身性能有关,与并联TVS二极管的数量无关,因此并联两个TVS二极管的支路会调节其吸收的能量与单个TVS二极管支路吸收的能量相近从而将电路中电压维持在一个相同的水平。当激励能量较低时,二者吸收的能量差距较小,但随着激励能量增大,单个TVS二极管的吸收能量逐渐接近上限,增加并联TVS二极管的个数能提高TVS二极管支路单位时间吸收能量上限,二者吸收能量差距增大,并联两个TVS二极管的支路单位时间内能吸收能量大于

表 3 S、S7 和 S77 样品爆发时间(t_b)及能量(E_b)

Table 3 Burst time (t_b) and energy (E_b) for S, S7 and S77 samples

| charging voltage / V | sample code | $t_b / \mu s$ | E_b / mJ |
|----------------------|-------------|---------------|------------|
| 15 | S | 22.50 | 1.74 |
| | S7 | / | / |
| | S77 | / | / |
| 18 | S | 12.55 | 1.62 |
| | S7 | / | / |
| | S77 | / | / |
| 21 | S | 9.41 | 1.74 |
| | S7 | 19.85 | 2.05 |
| | S77 | / | / |
| 24 | S | 8.10 | 1.71 |
| | S7 | 13.23 | 2.02 |
| | S77 | 24.36 | 2.15 |

Note: The “/” indicates that the SCB initiator item had either ignited prior to this point or had not ignited throughout the entire discharge period; the same applies to subsequent occurrences.

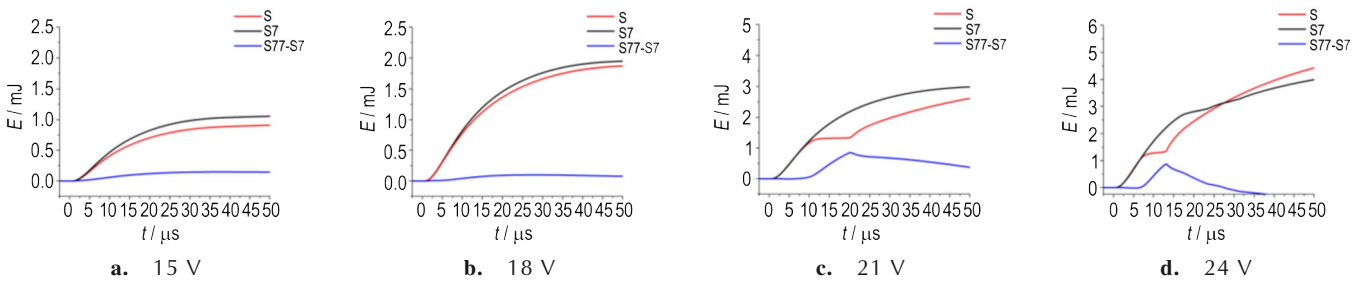


图 7 流经 AT7 型 TVS 二极管的总能量(E_t)随时间变化图

Fig.7 Time dependent curves of total energy (E_t) flowing through type AT7 TVS diode

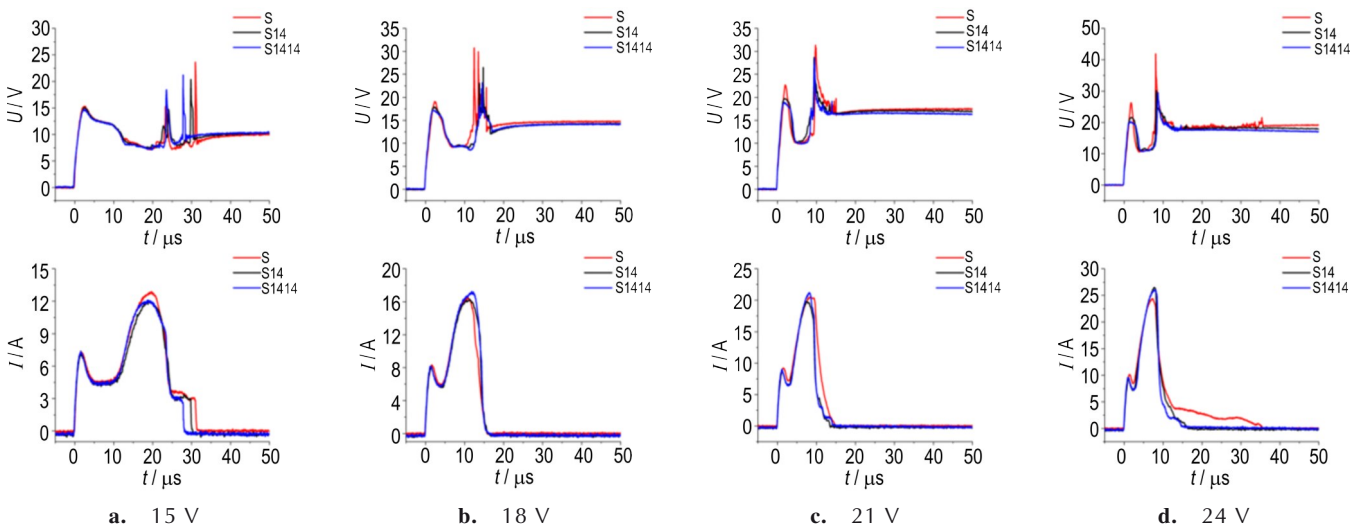


图 8 S、S14、S1414 型样品的电爆曲线

Fig.8 Electrical explosion curves of S, S14 and S1414 samples

单个 TVS 二极管吸收的能量,从而导致作用在 SCB 火工品换能元上的能量低于并联一个 TVS 二极管的 SCB 火工品换能元上的能量。

通过实验分析,平面集成 TVS 二极管并联个数对 SCB 火工品换能元爆发性能的影响规律如下:当激励能量足够使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近其上限时,增加并联平面集成 TVS 二极管的数量会延长 SCB 火工品换能元的爆发时间,甚至影响 SCB 火工品换能元正常爆发。反之,若激励能量不足以使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近其上限,则 SCB 火工品换能元爆发性能不会随并联平面集成 TVS 二极管的数量变化而变化。

为进一步验证上述结论,对 S 型、S14 型和 S1414 型样品不同激励能量下的电爆曲线进行了检测,结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,S 型、S14 型和 S1414 型样品爆发前电爆曲线基本重合,说明并联 TVS 二极管不影响 SCB 火工品换能元的爆发性能,SCB 火工品换能元的爆发性能也不受并联 TVS 二极管数量的影响。

采用t检验对S14型和S1414型样品在不同激励能量下的爆发时间和爆发能量是否存在显著性差异进行检验(取显著性水平 $\alpha=0.05$, $n_1=3$, $n_2=3$,查表得到 $t_{1-\alpha/2}\{n_1+n_2-2=4\}=2.776$),结果如表4所示。

由表4可知,S14型和S1414型样品爆发时间和爆发能量的t检验值都小于2.776,表明S14和S1414型样品的爆发性能没有显著性差异,SCB火工品换能元爆发性能不随TVS二极管并联数量变化而变化。

表4 S14,S1414型样品爆发时间(t_b)及能量(E_b)t检验结果

Table 4 Test results of burst time (t_b) and energy (E_b) for S14 and S1414 samples

| charging voltage / V | sample code | $t_b / \mu s$ | $\sigma_{t_b} / \mu s$ | t value for t_b | E_b / mJ | σ_{E_b} / mJ | t value for E_b |
|----------------------|-------------|---------------|------------------------|-------------------|------------|---------------------|-------------------|
| 15 | S14 | 23.96 | 0.01 | 0.651 | 1.69 | 0.01 | 0.644 |
| | S1414 | 24.46 | 1.33 | | 1.72 | 0.08 | |
| 18 | S14 | 13.66 | 0.54 | 0.019 | 1.66 | 0.08 | 0.215 |
| | S1414 | 13.67 | 0.75 | | 1.64 | 0.14 | |
| 21 | S14 | 9.78 | 0.33 | 1.265 | 1.67 | 0.05 | 0.879 |
| | S1414 | 10.45 | 0.86 | | 1.73 | 0.12 | |
| 24 | S14 | 8.34 | 0.14 | 2.076 | 1.75 | 0.04 | 1.822 |
| | S1414 | 9.09 | 0.61 | | 1.94 | 0.18 | |

Note: σ_{t_b} represents the standard deviation of t_b , σ_{E_b} represents the standard deviation of E_b .

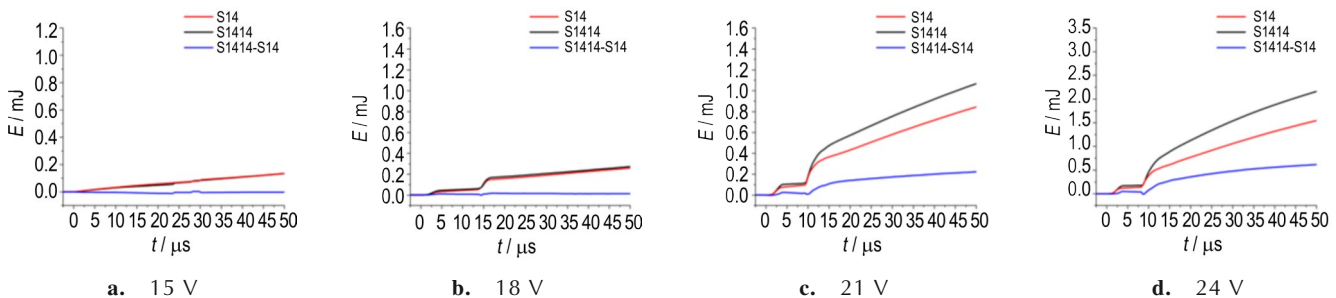


图9 流经AT14型TVS二极管的总能量 E_t 随时间变化图

Fig.9 Time dependent curves of total energy (E_t) flowing through type AT14 TVS diode

2.1.2 击穿电压的影响

由表3和表4中数据对比S、S7和S14三种类型样品在四种电容充电电压下爆发时间和爆发能量如图10所示。由图10可知,在相同的电容充电电压下,当电容充电电压为15 V、18 V时,S7型样品未爆发,S型和S14型样品的爆发时间和爆发能量接近,当电容充电电压21 V、24 V时,S型和S14型样品爆发时间和爆发能量仍接近,都远小于S7型样品的爆发时间和爆发能量。

由此可知,SCB火工品换能元的爆发时间和爆发能量随平面集成TVS二极管击穿电压的降低而增大,当电容充电电压较低时,击穿电压过低的TVS二极管分流后可能影响SCB火工品换能元正常爆发。这是

对TVS二极管支路吸收的能量进行计算,结果如图9所示,由图9可以看出,在SCB火工品爆发前两个TVS二极管吸收的能量与一个TVS二极管吸收的能量相近且值极小,值小于0.1 mJ,TVS二极管吸收的能量未接近其上限,因此SCB火工品换能元爆发性能不随TVS二极管并联数量变化而变化,可见改变并联平面集成TVS二极管的种类后并联TVS二极管个数对SCB火工品换能元爆发性能的影响仍符合上述研究结论。

由于击穿电压的大小决定了平面集成TVS二极管被击穿的难易程度,击穿电压越小,平面集成TVS二极管越容易被击穿,吸收的能量就越多,作用在SCB火工品换能元上的能量就越小,从而导致了爆发时间的延长,在SCB火工品换能元爆发过程中电能被转换成热能,一部分热能向四周传递并未作用在桥上,爆发时间的延长会导致向四周传递的热能增加,这一部分热能在计算时被作为爆发能量的一部分,因此爆发能量也会随平面集成TVS二极管击穿电压的降低而增大。

2.2 静电可靠性能的影响因素研究

为研究平面集成TVS二极管并联个数与击穿电压对SCB火工品换能元静电可靠性能的影响,开展了500 pF/500 Ω /25 kV静电放电实验,首先测试了各型

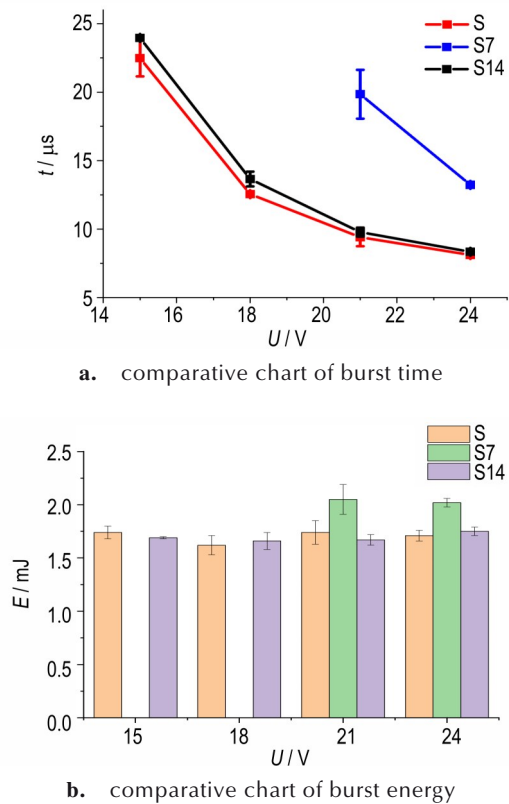


图10 S、S7和S14型样品爆发时间和爆发能量对比图
Fig.10 Comparison of burst time and burst energy for S, S7, and S14 samples

号样品的静电作用前后电阻;之后,对样品桥区烧蚀程度进行了分析。表5为各型号样品静电作用前后电阻,实验过程中所有样品均未爆发。

由表5可知,没有平面集成TVS二极管防护的S型样品在静电作用过后平均电阻由1.053 Ω增大至2.559 Ω,电阻增大了一倍多,在并联平面集成TVS二极管后,S7、S14和S1414型样品静电作用后电阻降低了0.1Ω左右,S77型样品静电作用后电阻基本不变,SCB火工品换能元静电可靠性得到提升,电阻变化量降低,样品静电前后电阻变化量由高到低依次为

表5 静电放电实验结果

Table 5 Experimental results of electrostatic discharge

| sample code | number of samples | average resistance before experiment / Ω | average resistance after experiment / Ω |
|-----------------------------|-------------------|--|---|
| S | 3 | 1.053 | 2.559 |
| without explosive materials | | | |
| S7 | 3 | 1.045 | 0.944 |
| S77 | 3 | 1.045 | 1.037 |
| S14 | 3 | 1.047 | 0.947 |
| S1414 | 3 | 1.045 | 0.931 |

S1414=S14=S7>S77。

对样品静电作用后的桥区进行显微观察,显微照片如图11所示。由图11可知,没有平面集成TVS二极管防护的S型样品静电作用后桥区产生了大量黑斑状烧蚀,烧蚀斑导致桥区导电性降低,因此S型样品静电作用后电阻增大。并联平面集成TVS二极管后,S7、S77和S1414型样品静电作用后桥区没有任何损伤,S14型样品静电作用后桥区产生轻微小点状烧蚀,SCB火工品换能元的桥区烧蚀程度降低,静电可靠性提升,结合表5中样品的电阻变化可知,静电可靠性由强到弱依次为S77>S7=S1414>S14。可见,SCB火工品换能元的静电可靠性随平面集成TVS二极管击穿电压的降低或平面集成TVS二极管并联个数的增加而提高。

并联单个或2个击穿电压7V的TVS二极管均可使SCB火工品换能元静电后桥区无损伤,但会极大程度延长SCB火工品换能元的爆发时间和爆发能量,并且该延长量会随着并联击穿电压7V的TVS二极管数量的增加而增大;并联单个或2个击穿电压14V的TVS二极管不会对SCB火工品换能元的爆发时间和

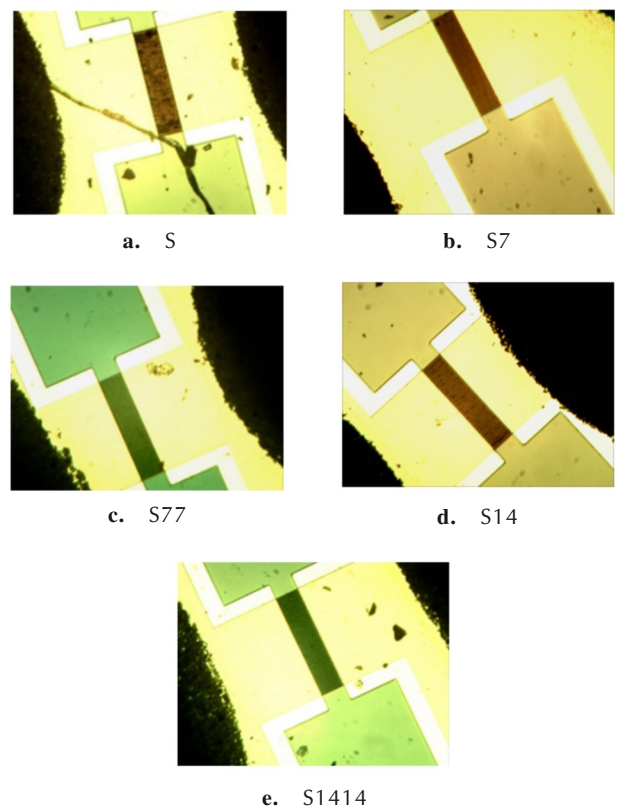


图11 静电放电后SCB火工品桥区显微照片
Fig.11 Micrograph of SCB initiator bridge area after electrostatic discharge

爆发能量产生显著性影响,但单个击穿电压 14 V 的 TVS 二极管提供的静电防护能力略有不足,静电后 SCB 火工品换能元桥区会产生烧蚀。因此,并联两个击穿电压略低于 14 V 或并联单个击穿电压略高于 7 V 的 TVS 二极管能够在保障 SCB 火工品换能元静电可靠性的前提下,不影响 SCB 火工品换能元的爆发性能。

3 结论

(1)当激励能量使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近其上限时,增加并联平面集成 TVS 二极管的数量会延长 SCB 火工品换能元的爆发时间,甚至影响 SCB 火工品换能元正常爆发。反之,若激励能量不足以使单个平面集成 TVS 二极管单位时间吸收的能量接近其上限,则 SCB 火工品换能元爆发性能不会随并联平面集成 TVS 二极管的数量变化而变化。

(2)当激励电压大于平面集成 TVS 二极管的击穿电压时,TVS 二极管击穿电压越低,SCB 火工品换能元的爆发时间越长,爆发能量越大,过低的击穿电压可能会影响 SCB 火工品换能元正常爆发。

(3)降低平面集成 TVS 二极管的击穿电压和增加并联平面集成 TVS 二极管数量都能够提高 SCB 火工品换能元的静电可靠性能。

(4)设计桥区尺寸为 $350\ \mu\text{m}(W)\times 100\ \mu\text{m}(L)\times 2\ \mu\text{m}(H)$ 的抗静电集成半导体桥芯片时集成两个击穿电压略低于 14 V 或一个击穿电压略高于 7 V 的 TVS 二极管能在不影响 SCB 火工品爆发性能的前提下提供较好的静电可靠性。

参考文献:

- [1] 祝逢春,徐振相,陈西武,等. 半导体桥火工品研究新进展[J]. 兵工学报,2003,24(1):106-110.
ZHU Feng-chun, XU Zhen-xiang, CHEN Xi-wu, et al. Recent Advances in the Study of Semiconductor Bridge Pyrotechnics [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 106-110.
- [2] 胡剑书,焦清介. 半导体桥升温方程研究[J]. 工程爆破,2008,14(2):77-79.
HU Jian-shu, JIAO Qing-jie. Study on the heating equation of semiconductor bridges [J]. *Engineering Blasting*, 2008, 14(2): 77-79.
- [3] 陈飞. SCB 火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
CHEN Fei. Study on the Electrostatic and Radio Frequency Damage Mechanism of SCB Pyrotechnic Devices and Their Reinforcement Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [4] 刘伟,罗鹏程. 复杂电磁环境对现代战争的影响及对策[J]. 国防科技,2007(11):71-76.
LIU Wei, LUO Peng-cheng. The impact of complex electromagnetic environments on modern warfare and countermeasures [J]. *National Defense Science and Technology*, 2007(11): 71-76.
- [5] 吴巍屹,古平,高鲁,等. 战场复杂电磁环境对装备保障的影响研究[C]//第二届电磁环境效应与防护技术学术研讨会论文集. 2011:171-173,197.
WU Wei-yi, GU Ping, GAO Lu, et al. Study on the Impact of Complex Electromagnetic Environments on Equipment Support in the Battlefield [C]//Proceedings of the 2nd Symposium on Electromagnetic Environmental Effects and Protection Technology. 2011: 171-173, 197.
- [6] NOVOTNEY D B, WELCH B M, EVICK D W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity [R]. AIAA99-2417, 1999.
- [7] 任钢. 半导体桥火工品电磁兼容技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.
REN Gang. Research on Electromagnetic Compatibility Technology of Semiconductor Bridge Pyrotechnic Devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [8] 杜培康. 压敏电阻用于 SCB 火工品电磁防护研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
DU Pei-kang. Research on the Electromagnetic Protection of Semiconductor Bridge Pyrotechnic Devices Using Varistors [D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [9] 王军,李勇,卢兵,等. 瞬态电压抑制二极管对半导体桥换能元电爆特性影响的模拟[J]. 含能材料,2019,27(10):837-844.
WANG Jun, LI Yong, LU Bing, et al. Simulation of the influence of transient voltage suppression diode on the electro-explosive performance of semiconductor bridge initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10): 837-844.
- [10] 黄亦斌. SCB 火工品静电防护与集成设计研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
HUANG Yi-bing. Research on Electrostatic Protection and Integrated Design of Semiconductor Bridge Pyrotechnic Devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [11] MARX K, BICKES Jr R, WACKERBARTH D. Characterization and electrical modeling of semiconductor bridges [J]. SAND97-8246, 1997.
- [12] 陈光海. 组合电磁防护器件的 SCB 火工品性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
CHEN Guang-hai. Performance Study of Composite Electromagnetic Protective Devices for SCB Pyrotechnics [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [13] 国防科学技术工业委员会. GJB5309.14. 火工品静电放电试验[S]. 2004.
State Defense Science and Technology Industry Committee. GJB5309.14. Pyrotechnic Electrostatic Discharge Test [S]. 2004.

Impact Factors of Planar Integrated TVS diodes on the Performance of Semiconductor Bridge Initiator Transducers

TAO Yu-ren, WANG Lei, ZHOU Bin, WANG Jun

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

Abstract: In order to investigate the influence and regularities of planar integrated transient voltage suppressor diodes (TVS) on the performance of anti-static integrated semiconductor bridge initiator transducers, capacitor discharge firing experiments were carried out to study the effect of the parallel quantity of planar integrated TVS diodes and breakdown voltage on the electrical explosion performance. Its influence on the static electrostatic reliability performance of semiconductor bridge initiator transducers were also investigated by 500 pF/500 Ω /25 kV static discharge experiments. The results indicate that when the excitation energy approaches the upper limit of the energy absorbed per unit time by a single planar integrated TVS diode, increasing the number of parallel planar integrated TVS diodes will prolong the burst time of the SCB initiator transducer element, and may even affect the normal bursting of the SCB initiator transducer element. Conversely, if the excitation energy is insufficient to bring the energy absorbed per unit time by a single planar integrated TVS diode close to its upper limit, the bursting performance of the SCB initiator transducer element will not change with the number of parallel planar integrated TVS diodes. When the excitation voltage exceeds the breakdown voltage of the planar integrated TVS diodes, the lower the breakdown voltage of the TVS diode, the longer the burst time of the SCB initiator transducers, and the greater the burst energy, and potentially affecting the normal burst of the SCB initiator transducer element. Reducing the breakdown voltage of the planar integrated TVS diodes and increasing the number of parallel diodes can enhance the electrostatic reliability of the SCB initiator transducers. When designing an antistatic integrated semiconductor bridge chip with dimensions of 350 μm (W) \times 100 μm (L) \times 2 μm (H), it is possible to integrate two TVS diodes with breakdown voltages slightly below 14 V, or one with a breakdown voltage slightly above 7 V.

Key words: ESD integrated SCB chip; initiator device; TVS diode; electrical explosion performance

CLC number: TJ5; TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024112

(责编:姜梅)