

文章编号: 1003-1480 (2020) 02-0021-04

# 半导体桥火工品连续电磁波环境效应研究

薛 颢, 杨安民, 李 欣, 夏冬星, 姚洪志

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘 要:** 针对武器系统中的半导体桥火工品无法满足在连续电磁波环境中使用要求的问题, 采用匹配滤波器的方式进行了半导体桥火工品的电磁防护设计, 并利用实验室建立的连续电磁波环境模拟系统对火工品进行了辐照研究。结果表明, 滤波器对半导体桥火工品在电磁场特别是高频电磁场中耦合的能量有明显衰减效果, 使其满足规定的安全裕度要求, 显著提升了半导体桥火工品及武器系统在高频电磁场中的安全性和可靠性。

**关键词:** 半导体桥火工品; 滤波器; 衰减; 电磁防护

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.006

## Research of Environmental Effect of Electromagnetic Waves on Semiconductor Initiator

XUE Hao, YANG An-min, LI Xin, XIA Dong-xing, YAO Hong-zhi

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** In view of the situation that the semiconductor bridge initiators in the weapon system cannot meet the requirements for use in the continuous electromagnetic wave environment, the electromagnetic protection design of the semiconductor bridge initiators was proposed by using matched filters, and the electromagnetic radiation experiment of continuous electromagnetic wave environment simulation established by the laboratory was carried out. The results show that the filter has a significant attenuation effect on the energy of the semiconductor bridge initiators coupled in the electromagnetic field, especially the high-frequency electromagnetic field, so that it meets the specified safety margin requirements, and significantly improves the safety and reliability of the semiconductor bridge initiators and weapon systems in electromagnetic fields.

**Key words:** Semiconductor bridge (SCB) initiator; Filter; Attenuation; Electromagnetic protection

电火工品是武器系统中实施点火、起爆等特种作用的最敏感的始发系统。在连续电磁波环境中, 武器系统处于直接暴露状态, 电磁波通过电磁辐射或者脚线耦合的方式作用于电火工品, 使得武器系统安全性和可靠性下降, 严重时会导致点火电路误爆, 造成人员伤亡等事故<sup>[1]</sup>。

第一代半导体桥 (SCB) 装置的抗射频能力高达 5W, 集成电路芯片进一步提高了其抗电磁危害性能<sup>[2]</sup>。但由于电磁环境日益复杂, 其安全性与可靠性面临更严峻的考验。张君德等人<sup>[3]</sup>采用了电子

电路中常用的高频保护元件铁氧体磁珠对 SCB 火工品进行射频防护, 测试结果表明防护效果极佳。但是由于其高频下的高阻值, 使得 GTEM 电场辐照时产生高温, 且对恒流作用没有抑制能力, 串联连接的要求也使封装结构复杂。任钢<sup>[4]</sup>采用 TVS 二极管对半导体桥进行射频和静电加固。实验表明经过 TVS 二极管防护后半导体桥火工品抗射频能力得到明显提高。但作为成熟的电子元件, 二极管的寄生电容均较小, 且封装体积大, 造成了电磁防护工艺的复杂和一致性的降低。目前国内没有利用滤

收稿日期: 2019-12-20

作者简介: 薛颢 (1995 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事火工品产品设计研究。

波器对半导体桥电点火具进行高频率电磁波防护的相关研究。

本文针对 SCB 火工品在连续电磁波环境工作时无法满足规定安全裕度的情况，采用匹配滤波器的方式进行了电磁防护设计，并利用实验室建立的连续电磁波环境模拟系统对 SCB 火工品进行了辐照研究，为同类武器的电磁防护提供了相关参考。

### 1 SCB 火工品及电磁防护设计

图 1 为加装滤波器的 SCB 火工品的结构图。

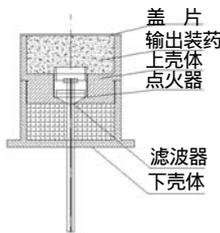


图 1 加装滤波器的 SCB 火工品结构图

Fig.1 Structure diagram of SCB initiators with filter

滤波器的作用是为了减少耦合到火工品中的电磁能量，能够提供期望的衰减值而不影响正常发火<sup>[5]</sup>。由于电磁能量主要通过脚线耦合的方式进入 SCB 火工品，因此，在半导体桥电火工品的脚线上采用附加滤波器就可以达到衰减射频能量的目的。经过多种型号滤波器对比分析，确定了高频滤波器进行实验。图 2 为滤波器滤波电路，由于火工品主要是差模电流敏感，因此滤波电路主要采取的是差模滤波电路，同时考虑到宽频的电磁干扰，采用 II 性滤波电路提高滤波性能。

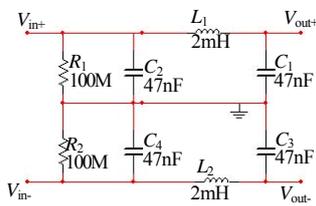


图 2 高频滤波器电路

Fig.2 High frequency filter circuit

### 2 SCB 火工品电磁波环境效应研究

#### 2.1 电火工品连续电磁波环境响应测试系统

连续电磁波辐照实验系统布局如图 3 所示，测试仪器：Agilent8257D 射频信号源、AR25W1000

功率放大器、PMM 8053B 场强测量计、低频天线、宽带喇叭天线、白光干涉型光纤测量系统。SCB 火工品射频电磁环境效应试验研究主要在电波暗室中进行，利用电磁辐射敏感度测试系统输出频率和功率可调射频源，经发射天线给电点火具施加不同频率和强度的电磁场。测试时将 SCB 火工品的脚线掰开形成对称振子天线状态，在  $1 \times 10^6 \sim 20 \times 10^9$ Hz 范围内，在水平极化模式下，选取多个频点，辐照场强 100V/m，建立 SCB 火工品在连续电磁波环境中的频响曲线，获得其在连续波电磁场中耦合规律。白光干涉型光纤测量系统主要用于电火工品电磁感应电流的探测。



图 3 电磁环境模拟测试系统

Fig.3 Electromagnetic environment simulation experiment system

图 4 为 SCB 火工品电场辐照试验布局结构示意图，对 SCB 火工品进行连续电磁波辐照试验时，根据在 SCB 上的测到的温度变化值即可在感应电流与 SCB 温度变化值平方根曲线上找到该温度变化值对应的电流值  $I_0$ 。将火工品的最大不发火电流  $I_{MNF}$  除以  $I_0$  即为该火工品在实验中连续电磁波环境中的安全裕度值，以分贝值表示为  $20\lg(I_{MNF}/I_0)$ 。如果  $I_0 < 0.1I_{MNF}$ ，则可以认为火工品满足 GJB 1389A-2005 中规定的安全裕度<sup>[8]</sup>。

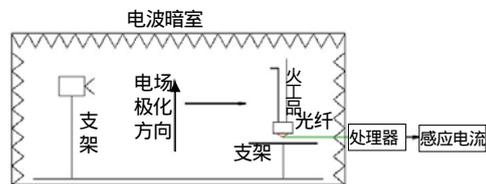


图 4 SCB 火工品电场辐照试验布局结构示意图

Fig.4 The diagram of electromagnetic radiation experiment for SCB initiators

#### 2.2 低频电磁波环境测试结果与分析

在实际测量中，700MHz 以上高频率点的 SCB 温度变化过小，无法准确测量其感应电流值，因此仅分析 0~678MHz 低频率段的 SCB 火工品感应电流响应情况，结果如图 5 所示。

根据试验结果得出，在 100V/m 电场中，SCB 火工品的感应电流大小随着频率的变化而变化，在 100 MHz 时，火工品感应电流出现最大值为 177.12 mA，在 325MHz 时，火工品感应电流出现第 2 大值，为 112.34mA；其中 100 MHz 附近 SCB 火工品所通过电流已超过 GJB 786-89 规定的电火工品安全裕度  $0.15I_{MNF}$  (150mA) [9]，其他频率点则未出现超出安全裕度的情况；使用滤波器后，SCB 火工品在 0~678MHz 频率段感应电流明显下降，未出现感应电流超出安全裕度范围的情况。

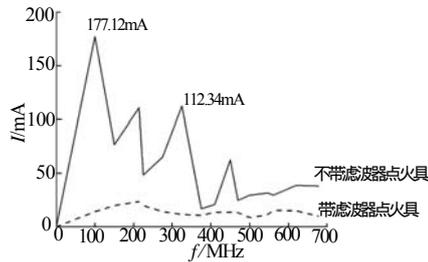


图5 0~678MHz 频率连续电磁波下 SCB 火工品感应电流响应

Fig.5 SCB initiator induced current response curve of 0~678MHz frequency electromagnetic wave

相同频率点，SCB 火工品脚线上的耦合电流与电磁场场强大小呈线性关系。可通过线性关系推算同频率点高场强耦合电流大小，将工作环境中实际场强代入计算公式 (1)：

$$\frac{E_t}{E} = \frac{I_t}{I} \quad (1)$$

式 (1) 中： $E_t$  为测试场强，100V/m； $E$  为实际工作场强； $I_t$  为测试出的耦合电流，mA； $I$  为推算耦合电流，mA。推算出的耦合电流如表 1 所示。

表 1 高场强电磁场推算电流

f/MHz	E/ (V · m <sup>-1</sup> )	I/mA	
		不带滤波器	带滤波器
100	330	584.50	46.66
100	1 000	1 771.20	141.40
325	330	370.72	38.44
325	1 000	1 123.40	116.50
678	330	125.76	32.67
678	1 000	381.10	99.00

通过表 1 中数据可得，0~678MHz 频率段，在 1 000V/m 场强环境中，多个推算点的不带滤波器 SCB 火工品耦合电流不仅不满足 GJB 786-89 规定安全裕度，更超出了 GJB 344-87 中规定的 1A1W5 min 火工品最小发火电流 [10]，会导致 SCB 火工品的意外发火。使用滤波器后，SCB 火工品满足规定安全裕度。

根据带滤波器 SCB 火工品与不带滤波器 SCB 火工品在各频率点电磁波下的感应电流变化，可以以分贝计算出滤波器的衰减度：

$$\text{衰减度} = 20 \lg I_{\text{滤波}} / I_{\text{无滤波}}$$

滤波器对感应电流的衰减度如图 6 所示。其中，100MHz 频率点处，衰减度为 21.95dB，高于 GJB 1389-2005 规定的 20dB 安全裕度要求，因此使用滤波器后的 SCB 火工品满足在低频率段电磁波环境中使用的要求。

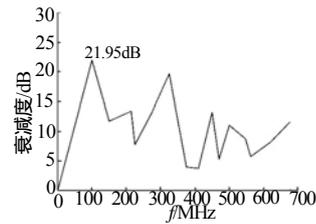
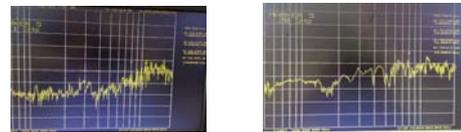


图 6 滤波器对感应电流的衰减度

Fig.6 Filter attenuation of induced current

### 2.3 高频电磁波环境滤波器衰减效果分析

由于高频电磁波环境中 SCB 火工品的耦合电流过小，超出实验测量的精度范围，可以测量滤波器对高频电磁波环境耦合能量的衰减情况，如图 7 所示。



(a) 7~9GHz

(b) 10~15GHz

图 7 滤波器对 1~15GHz 频率电磁能量的衰减情况

Fig.7 Filter attenuation of 1~15GHz frequency electromagnetic energy

根据 SCB 火工品实际工作环境选择典型频率点，其衰减度如表 2 所示。

表 2 各频率点衰减度数据表

f/GHz	衰减度/dB
7	62.54
8	62.14
9	66.70
10	54.96
11	58.81
15	56.83

前文对于低频率电磁波环境中使用滤波器后的 SCB 火工品上产生耦合电流的大小进行了高场强推算，虽然使用滤波器后显著降低了火工品上的耦合电流，使其满足安全裕度要求。但随着电磁环境日益复杂与强电磁武器的发展，火工品在战场中会面临更高场强的电磁波环境，会使得火工品上耦合

到更多电磁能量，从而超出火工品的安全裕度，严重时会导致意外发火的情况出现，进一步降低武器系统中 SCB 火工品的安全性与可靠性。

在 100V/m, 1~15GHz 高频率电磁波环境中，SCB 火工品上产生的感应电流极小（ $10\text{mA}$ ），对于火工品的性能影响较小，但随着电磁环境场强的增大，其安全性也会不断下降。滤波器对高频电磁场中耦合电磁能量的衰减较低频电磁场效果更好，远高于 GJB 1389-2005 规定的 20dB 安全裕度，平均值约为 60dB，根据衰减度公式计算可知，滤波器可将高频率电磁能量衰减 1 000 倍，即可以使  $I_{\text{耦合}}$  150A 的 SCB 火工品在使用滤波器后满足规定安全裕度要求，大大提升了 SCB 火工品及武器系统的安全性和可靠性。

### 3 结论

通过对 SCB 火工品进行了电磁防护设计，利用连续电磁波环境模拟系统进行了辐照实验，并对实验结果进行了高场强推算，主要结论如下：

（1）在 100V/m, 0~678MHz 低频电磁波环境中出现了 SCB 火工品耦合电流超出规定安全裕度要求的情况。随着场强的不断增大，耦合电流会不断增大，甚至超出了最小发火电流，严重时会导致 SCB 火工品意外发火，而使用滤波器后 SCB 火工品的耦合电流明显减小，满足了安全裕度要求。

（2）在 100V/m, 1~15GHz 高频率电磁波环境中，SCB 火工品上产生的感应电流极小，对于火工品的性能影响较小，但随着电磁环境场强的增大，

其安全性会不断下降。滤波器对高频电磁场中耦合电磁能量的衰减较低频电磁场效果更好，即使在高场强电磁环境中也满足规定要求，显著提升了 SCB 火工品及武器系统在高频率电磁场中的安全可靠。

#### 参考文献：

- [1] 王军,李勇,周彬,陈厚和,杜伟强,范晓巍.电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望[J].含能材料,2017,25 (11): 954-963.
- [2] Novotney David B., Welch Brendan M., Evick David W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity[R].AIAA99-2417,1999
- [3] 张君德.铁氧体磁珠用于 SCB 防射频技术的研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [4] 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 .
- [5] 陈飞,周彬,秦志春,李敏,李鹏.半导体桥火工品的防静电和防射频技术[J].爆破器材,2010,39(03):28-32.
- [6] 陈穷主编.电磁兼容性工程设计手册[M].北京:国防工业出版社,1993.
- [7] 靳伟,廖延彪,张志鹏,等著.导波光学传感器:原理与技术[M].北京:科学出版社,1998.
- [8] GJB 1389A-2005 系统电磁兼容性要求[S].北京:总装备部军标出版发行部,2006 .
- [9] GJB 786-89 预防电磁场对军械危害的一般要求[S].北京:国防科学技术工业委员会,1989.
- [10] GJB 344-87 钝感电起爆器通用设计规范[S].北京:国防科学技术工业委员会,1987.