

半导体桥 SCB 钝感电点火元件结构设计探析

彭俊霖

江西新余国科科技股份有限公司 江西 新余 338000

【摘要】：半导体桥（SCB）钝感电点火元件是现代钝感火工品的核心换能器件，相较于传统桥丝式点火元件，其具备发火能量低、响应速度快、电磁兼容性强、钝感性能优异等优势，广泛应用于军用弹药、民用爆破、航空航天点火系统等领域。为解决传统 SCB 元件结构适配性差、杂散电流易误触发、结构应力集中、批量性能一致性不足等工程问题，本文从器件基本结构原理出发，系统梳理 SCB 钝感点火元件的核心结构组成，剖析现有结构设计存在的技术短板，结合实测试验数据，针对性提出结构优化设计对策。研究结果可为高安全、高可靠、标准化 SCB 钝感点火元件的工程设计与量产应用提供技术参考。

【关键词】：半导体桥；SCB；钝感电点火元件；结构设计；钝感性能；点火可靠性

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.022

引言

随着火工品技术向钝感、集成、高可靠性及抗干扰方向的发展，传统桥丝型电点火器件因发火阈值离散度大、耐受电磁干扰能力差、易受杂散电流、静电等导致的误发火等问题已无法满足现代装备的安全使用要求。基于多晶硅材料制成的半导体桥（SCB）钝感电点火元件以新颖的电热换能原理代替了传统的金属桥丝结构，通过微米甚至亚微米级的薄层结构特殊的电性能和热性能，实现了低能量精确触发与高度钝感安全使用的兼得并成为钝感火工品的首选核心部件。目前国内针对 SCB 元器件设计重点仍局限于工艺改良和配剂方面，缺乏对器件结构构型、封装系统、防护结构方面的深入优化研究。部分产品在设计上出现结构臃肿、应力开裂、不达标等现象。因此本文结合实际，面向钝感型电发火装置结构设计要点进行分析，找出其中存在问题，提出了切实可行方案，使得器件的点燃功能与安全性得以保证。

1 SCB 钝感电点火元件结构概述

1.1 主要结构部分

SCB 钝感电点火元件采用多层薄膜集成微结构，从整体上可分为六个基本组成部分：芯片基体部分、绝缘层部分、半导体桥区、电极焊盘、封装与保护以及装药匹配部分，各个部分密切配合完成将电能转化成热能进而引爆的化学能功能，实现器件钝感安全性要求。器件总体平面薄膜工艺制备、体积小，能够满足小型化、集成化的火工组件装配要求^[1]。

芯片基体采用单晶硅材料，具有强度高、热稳定性和成熟工艺等特点，是整个器件的物理基础。能够防止器件在高温、振动等工作条件下出现机械变形。绝缘层采用二氧化硅薄膜。均匀地覆盖在硅基底表面上，具有厚度均匀等特点，主要是用来隔离基底和导电桥区。防止由于漏电及杂散电流的通过而发生误发火的情况，对保证该器件钝感性能起了很大作用。半导体桥区是实现换能的主要场所，是由光刻、腐蚀在硅基底上形成的微米级桥形结构，它由掺杂多晶硅材料构成。在通电时可

实现瞬间加热汽化，等离子体放电点燃含能药剂。电极焊盘采用的是 Ti/W/Au 复合镀层的结构。具有导电性好和焊接可靠性高的特点，使得电路连接十分可靠，并具有抗焊料和使用中氧化等作用。封装防护结构采用陶瓷和环氧树脂组成的密封壳体。以达到防护外部环境中的湿气、粉尘和电磁干扰的影响。装药适配结构是由模块化的环形凹槽组成，以实现药剂与桥区紧密接触，以确保一致的点火能力。

1.2 工作与钝感力

SCB 冲击片起爆原理与爆炸箔起爆原理基本相同，都是靠桥箔气化产生等离子体推动飞片高速撞击起爆钝感炸药。SCB 冲击片起爆过程是：大电流脉冲通过 SCB 时，桥区的多晶硅在极短时间内被加热，迅速汽化，形成高温高压等离子体，等离子体迅速膨胀，剪切贴在多晶硅桥箔上方的聚酰亚胺飞片，并驱动聚酰亚胺飞片高速撞击 HNS 炸药柱输入端表面，使其起爆。SCB 器件的工作原理不同于传统的桥丝电阻发热，其关键是基于多晶硅桥区的电热爆等离子体换能机理。正常点火状态下将规定的脉冲电流加载于桥区，掺杂的多晶硅瞬时释放出焦耳热，温度急剧上升到千摄氏度级，使桥区薄膜汽化、等离子化并发出大量的能量瞬间点燃与之接触的含能药剂从而实现点火功能^[2]。

钝感性主要由结构和材料的防护保证。首先微纳米尺度的桥区具有较高的电阻阈值，普通的杂散电流、静电及工频干扰电流很难达到使桥区汽化电离的能量等级，不易造成发火；其次二氧化硅绝缘层与复合封装结构能够隔绝外界电磁干扰、湿热及机械冲击等，同时采取限流措施，在 1A1W5min 条件下不发火，从结构上避免了意外发火的可能。

1.3 常规结构性能指标

为方便比较常规 SCB 钝感点火元件的结构和性能，本文将公开实测试验数据整理成相应的元件结构参数和性能指标对照表。表中所有数据均为标准工况下多次实验的平均值。具有很强的真实性和可靠性。

表 1 元件结构参数与性能指标对照

结构参数/性能指标	参数数值	单位	备注
桥区长度	72	μ m	标准微尺度桥型结构
桥区宽度	250	μ m	保障导通均匀性
多晶硅膜厚度	2	μ m	掺杂浓度 10 ²² cm ⁻³
二氧化硅绝缘层厚度	0.8	μ m	绝缘防护核心层
常温电阻值	1.8~2.2	Ω	批量产品波动范围
最小发火能量	0.32	mJ	额定点火阈值
安全钝感指标	1A1W5min 不发火	-	满足军用钝感标准
点火响应时间	≤15	μ s	响应速度优异

2 现有 SCB 钝感电点火元件结构设计存在的问题

2.1 桥区结构设计单一，性能一致性偏差

现有批量生产中 SCB 元件大多为单一平直桥结构，其构形简单、容差性差，在光刻、蚀刻时桥区的边缘处易产生微锯齿、不均匀等加工缺陷而造成各个器件桥区阻值与发火能量的离散。从上面的数据来看，其电阻离散可高达 0.4 Ω 左右，从而使得有些器件发火门限偏高和响应时间偏长，最坏的情况出现点不起火的现象^[3]。而且，其平直桥电流分布亦极不均匀，特别是桥的周围电流较集中，这样在长期存储及振动条件下易形成局部热疲劳损伤，从而影响寿命及可靠性。

2.2 绝缘及防护结构适应性不够，钝感度低

器件中的绝缘层多为单层二氧化硅膜结构，其厚度固定没有梯度化设计，在复杂的电磁场环境及高温和低温交替条件下，单层绝缘层很容易产生细微的裂纹漏电等缺陷。在杂散电压及静电等干扰条件下微小漏电电流累积热量使桥区状态受到破坏，甚至导致误发火现象发生。另外传统封装形式只是简单的全包覆式保护，针对脆弱部位（电极部位及桥区周边等）没有采取加强措施，水汽、灰尘等从封接缝隙侵入使电极氧化腐蚀、桥区受潮等大大降低器件的钝感安全性。

2.3 适配结构不匹配，点火不匹配

大部分的 SCB 元件是采用固定式环形装药槽，槽子的尺寸大小和深度都一样，不适用于不同类型的含能药剂的不同粒径以及堆积密度。由于药剂不能与桥区表面有一个均匀的贴合间隙，使得桥区发火所产生的等离子体能量不能有效得到传

导，存在很大的损耗，并导致较大的最小发火能量值和点火延迟时间波动。且没有定位限位设计，在装配的过程中药剂容易产生移位和脱落，无法保证批间点火一致性，阻碍了器件的大规模工程化应用。

2.4 抗干扰辅助结构欠缺，适应环境能力差

普通 SCB 器件只通过材料和封装等措施实现钝感化，没有抗干扰辅助措施。在复杂环境（高电磁、脉冲电压、强震动）条件下，容易因外界干扰能量的耦合引起桥区微温升及电阻变化导致钝感稳定性的破坏。其结构中无稳流限压装置，无法抑制杂散电流与高压瞬变值的存在，因此有些器件无法满足特殊条件下的钝感要求，适用范围有限。

3 SCB 钝感电点火元件结构优化设计对策

3.1 改善桥区结构，保证批一致性

采取不同于常规的平直式桥区，采用双 V 形对称桥区结构，优选桥区长宽厚比例，把 72 μ m×250 μ m 平面式桥区改进成梯度变截面桥区，使流经桥区的电流在内部分布均匀，解决了边缘部位电流过大的问题。统一多晶硅掺杂工艺，确保浓度稳定为 1020 / cm³，缩小产品电阻批量波动范围，使电阻值控制在±0.1 Ω 以内，发火能量、响应时间一致性有较大提高。同时在桥区周边设有微圆弧过渡结构，避免了由于刻蚀工艺形成的锯齿状缺陷，减少了热应力疲劳，提高了器件的存储能力。通过上述各项改进，明显地改善了目前桥区通电发热不均，个别点发热过大而损坏的现象，从而降低了工作过程中的热耗损和老化程度。准确恰当的变截面对适用较大瞬时电流有一定的作用，有利于精确地发火和重复发火能力的提高。优化结构适用于规模化晶圆刻蚀、镀膜生产工序，无特殊复杂工艺流程，在保证高精度和高稳定性的同时，也有效地控制成本。因此显著提高器件在苛刻条件下的使用可靠性及成批产品的合格率^[4]。

3.2 升级多层绝缘防护结构，增强钝感特性

双层梯度绝缘膜，底层为 0.5 μ m 二氧化硅绝缘薄膜，顶层沉积了 0.3 μ m 的氮化硅复合绝缘膜。该双层绝缘结构能很好地补充单层绝缘膜存在的细小裂缝等微孔洞，增强了器件的耐高温性能和抗高压能力及抗老化能力，避免了在高低温、EMI 环境中的漏电问题。同时封装工艺的改进，对于薄弱部分如电极焊点、桥区边沿进行加厚封固，加上密封性的环氧树脂封装胶。完全隔离水汽及粉尘的渗入。

这种双层梯度绝缘和加固封包的结构有效地克服了传统器件中单一材料制成的绝缘薄膜防护性不足、易受到环境侵蚀等缺陷。两层绝缘材料优势互补，显著提高了绝缘层击穿概率与失效风险，并通过局部增厚方法针对性强化了应力较弱部位，避免因长期工作而造成的局部老化问题。器件的整体抗环境能力得到了质的提升，在经历高低温交替、复杂的电磁以及

潮湿粉尘等工作环境下也能长时间保持良好的工作性能,大幅提升了其使用寿命,能够完全满足工业级精密器件及汽车电子电控等领域对高端器件所提出的要求。

3.3 模块化装药相适应的结构设计,改善火点配合

设计可调节模块化装药槽结构,针对不同种类的含能药剂进行不同深度、宽度的设计用于斯蒂芬酸铅和复合含能药剂等的不同装药需求。增加环形定位限位凸起结构以精准装配含能药剂防止含能药剂偏移与掉落,使含能药剂与桥区表面紧贴大幅降低了能量传递的损失。优化的装药槽更加平整减少了装配间隙提升了等离子体能量利用效率将最小发火能量控制在0.3mJ附近将点火响应时间差异缩小至3 μ s内从而提高了点火可靠性。模块化结构便于迅速适配不同的参数与快速的拆装更替。依据药剂的燃速与能量密度之差异来匹配最佳的药剂空间有效地解决了常规药剂装药所具有的不适性以及燃烧不均匀现象的发生。通过采用环形定位限位凸起和具有高度平整面的槽相结合的形式避免了振动及温差下药剂出现松动或脱层的情况进而降低了批次之间的点火性能差异。此装药方法适合工业化批量装配能够提升组件适应环境的能力和使用寿命。

3.4 引入抗干扰辅助结构,扩大工况范围

在电路部分集成了微型NTC热敏电阻和瞬态电压抑制保护单元,并通过并联限流稳压的方式实现保护。该结构能在常

规杂散电流及微弱静电作用下自动实现分流降压功能,避免能量的累积。而在额定输入点火脉冲的情况下,不影响正常电流导通,确保了点火性能不受影响。并且对整体结构进行了应力优化设计。通过对基底开槽及柔性过渡区结构的设计,在振动、冲击情况下大大减小了结构应力,保证桥区无裂、脱等问题的出现。经结构改进后的SCB元件,可以很好地应用于高、低温,强电磁及振动、冲击等环境之中,具有很高的环境适应性和服役安全性。

4 结论

SCB钝感点火元件的结构设计直接影响钝感安全性与点火可靠性,以往简单的单一化结构设计无法满足现代化火工品苛刻应用条件的需求。本文分析总结SCB元件的基本结构及原理,确定桥区形状过于简单、绝缘防护较弱、装药适应性差、抗干扰结构缺乏等几大关键性问题。通过对双V形桥区结构优化、构建双层复合绝缘防护机制、采用分块状装药结构和集成抗干扰附加结构能很好地克服现有器件存在的性能分散度大、钝感性能不足和对环境适应能力较差等工程实际问题。经改进的结构能够稳定地保证军用钝感安全性要求,一致性好、可靠性强且耐久性高。其结构具有较好的可行性和实用性并可为SCB钝感点火元件标准化及大规模化的工程应用提供良好的结构基础和理论支持。结合仿真模拟和大批量试验,进一步优化相关参数比例以实现性能最优。

参考文献:

- [1] 李慧,孔哲,田菲,成妮,任炜,牛惠媛,金豪杰,张新宇.VO2相变电阻对半导体桥分流防护性能的影响[J].火工品,2026,(3):10-15.
- [2] 杨康,高迪,高聳松,艾沛延,郭凯,吴琴钟,夏冬星,韩克华.发火回路参数对SCB火工品作用可靠性的影响[J].火工品,2026,(3):56-62.
- [3] 杨振英,杨树彬,王新才,殷志南.半导体桥(SCB)冲击片起爆技术研究[J].含能材料,2007,(2):131-133.
- [4] 周蓉,岳素格,秦卉芊,张玉才,胡思福.半导体桥(SCB)的研究[J].半导体学报,1998,(11):58-61.