

不同掺杂元素对 SCB 电爆特性的影响

文雷鸣¹, 刘恩良², 李 凯², 周 彬¹, 孟海东¹

(1. 南京理工大学, 江苏 南京, 210094; 2. 航天科工六院 41 所, 内蒙古 呼和浩特, 010010)

摘 要: 为研究不同掺杂元素对半导体桥电爆特性的影响规律, 利用电容放电发火系统, 对硼掺杂 SCB 和磷掺杂 SCB 的临界发火电压、发火时间以及发火所消耗的能量进行了测试, 并做了对比分析。结果表明: 在尺寸相同、掺杂浓度相同的条件下, 磷掺杂半导体桥比硼掺杂半导体桥临界发火电压低; 相同发火电压下, 掺杂元素对发火时间的影响较小, 并且磷掺杂半导体桥的发火能量比硼掺杂半导体桥的高, 说明磷掺杂 SCB 性能优于硼掺杂 SCB。

关键词: 半导体桥; 掺杂元素; 发火时间; 发火能量

中图分类号: TJ450.4 文献标识码: A

Effect of Different Doping Elements on Electro-explosive Characteristics of SCB

WEN Lei-ming¹, LIU En-liang², LI Kai², ZHOU Bin¹, MENG Hai-dong¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. The Six Academy of China Aerospace Science & Industry Group 41, Huhehaote, 010010)

Abstract: By use of capacitor discharge ignition system, the effect of different doping elements on electro-explosive characteristics of semiconductor bridge (SCB) was studied, based on the tested critical ignition voltage, ignition time and firing energy of SCB. It can be concluded that the critical ignition voltage of P-doped SCB was lower than that of B-doped SCB, on the same ignition voltage condition, doping elements had less effect on the ignition time, and the firing energy of P-doped SCB was higher than that of B-doped SCB. The study indicated that the performance of P-doped SCB is better than that of B-doped SCB.

Key words: Semiconductor bridge; Doping elements; Ignition time; Firing energy

随着科学技术的发展和国防现代化的建设, 对现代火工品提出了小型化、高安全可靠、高精度与抗电磁辐射的要求, 传统的火工品性能已经很难适应现代要求, 新型火工技术如半导体桥火工技术、直列式起爆技术、MEMS火工技术^[1]等得到快速发展。

半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)火工品以半导体桥芯片上的多晶硅薄膜作为发火元件^[2-4], 其参数对SCB火工品的性能具有重要影响。毛国强^[5]研究了桥形状、掺杂浓度、长宽比、质量对SCB电爆性能的影响, 周彬等^[6]研究了半导体桥上尖角、圆孔对其

电爆性能的影响。但这些研究都是基于掺杂磷的n型半导体, 本文通过设计不同的掺杂杂质(磷与硼)及桥尺寸的SCB芯片, 研究在相同掺杂浓度、相同尺寸的情况下, 磷掺杂与硼掺杂对SCB电爆特性的影响, 为SCB设计提供依据和支持。

1 实验部分

1.1 实验样品

图1为典型的重掺杂多晶硅半导体桥结构简图,

桥呈“H”形,由夹在硅基片与焊接区之间的重掺杂多晶硅构成,掺杂浓度约为 $10^{19}/\text{cm}^3$ 。将SCB芯片用环氧树脂粘接在陶瓷塞凹槽内,然后用超声波键合工艺把键合丝焊接在芯片的焊接区上,与外脚线形成连接,制成SCB电极塞。本文的多晶硅薄膜采用两种不同的掺杂元素:硼掺杂和磷掺杂,且掺杂浓度相同;桥形设计了两种尺寸,一种为典型尺寸($100\mu\text{m}\times 380\mu\text{m}$)的SCB,一种是小尺寸($56\mu\text{m}\times 356\mu\text{m}$)SCB,共4组样品。

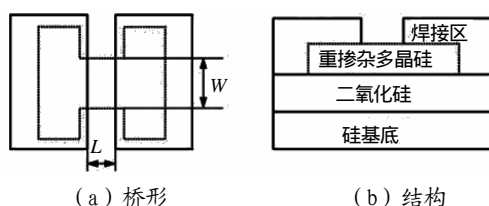


图 1 典型 SCB 结构图

Fig.1 Structure of the typical SCB

1.2 实验装置与原理

实验发火装置由储能电容、稳压电源、开关、数字示波器等组成,实验原理如图2所示。

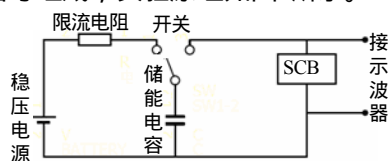


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device

储能电容为钽电容,它具有漏电流小、内阻小、放电快的特点。实验电路连接完成后,调节开关使电源为储能电容充电。充电至预定电压后,调节开关,使SCB通电发火。采用数字示波器(OSC-Lecroy WavePro960,带宽2GHz,最高采样速度为100Ms/s)采集记录发火过程中SCB两端的电压和电流信号,电压探头型号为Lecroy PP006;电流探头型号为Lecroy CP150。典型电爆性能曲线如图3所示。

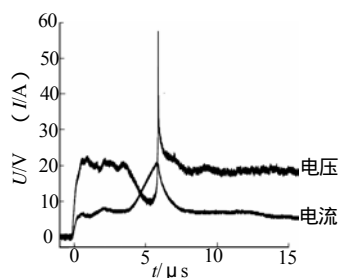


图 3 典型电爆性能曲线

Fig.3 Typical curve of electro-explosive characteristics

电压曲线上第2个峰值所对应的时间为爆发时

间,电压与电流的乘积为功率,由功率对时间积分得到发火能量,积分时间段为通电时刻至爆发时刻。

2 结果与讨论

2.1 掺杂元素对典型尺寸 SCB 电爆性能的影响

在 $47\mu\text{F}$ 电容放电条件下进行发火试验,采用逼近法获得典型尺寸硼掺杂SCB与磷掺杂SCB的临界发火电压,这里的临界发火电压指使SCB发生等离子体发火的最小电压,即图3所示的电压曲线出现的二次峰,数据见表1和表2。

表 1 典型尺寸硼掺杂 SCB 临界发火电压

Tab.1 Critical ignition voltage of B-doped SCB with typical size

序号	充电电压/V	实验结果
1	21	发火
2	21	发火
3	20	不发火
4	20	不发火
5	18	不发火
6	15	不发火
7	9	不发火

表 2 典型尺寸磷掺杂 SCB 临界发火电压

Tab.2 Critical ignition voltage of P-doped SCB with typical size

序号	充电电压/V	实验结果
1	15	发火
2	14	发火
3	13	发火
4	13	发火
5	13	发火
6	12	不发火
7	12	不发火

由表1~2可知,典型尺寸的硼掺杂SCB的临界发火电压为21V,磷掺杂SCB的临界发火电压为13V,说明磷掺杂SCB更容易发火。自临界发火电压开始,进行SCB的发火实验,实验结果见表3~4。

表 3 典型尺寸硼掺杂 SCB 发火时间与发火能量

Tab.3 Function time and firing energy of B-doped SCB with typical size

数量	充电电压/V	平均发火时间/ μs	平均发火能量/mJ
3	21	8.29	0.85
	24	5.94	0.87
	27	4.40	0.79
	30	3.83	0.86

根据表3和表4,得到典型尺寸硼掺杂与磷掺杂SCB在 $47\mu\text{F}$ 条件下,发火时间、发火能量均值随充电电压的变化关系,如图4所示。从图4曲线来看,随着充电电压的增加,发火时间呈指数下降,硼掺杂与磷掺杂SCB相差不大;发火能量都是先减小再增大,因

为发火能量是功率对发火时间的积分,而在一定范围内随着充电电压增大,功率增大,但是发火时间却下降地很快,使发火能量减小;当充电电压继续升高,发火时间下降的幅度已很小,则功率仍然增大,从而使发火能量增加。不过,磷掺杂SCB比硼掺杂SCB发火能量明显要高。

表 4 典型尺寸磷掺杂 SCB 发火时间与发火能量

Tab.4 Function time and firing energy of P-doped SCB with typical size			
数量	充电电压/V	平均发火时间/ μ s	平均发火能量/mJ
3	13	26.65	1.43
	16	13.24	1.16
	19	9.05	1.06
	21	7.35	1.12
	24	5.79	1.26
	27	4.67	1.32
	30	4.24	1.56

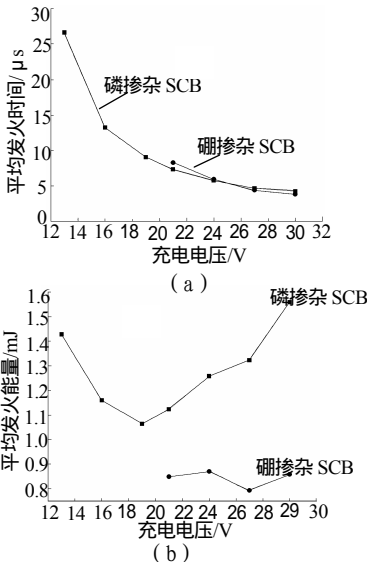


图 4 典型尺寸 SCB 发火时间、发火能量与充电电压关系
Fig. 4 Function time and firing energy of typical size SCB with different voltage

2.2 掺杂元素对小尺寸 SCB 电爆性能的影响

与典型尺寸SCB测试方法相同,采用逼近法求得小尺寸 (56 μ m \times 356 μ m) 硼掺杂与磷掺杂SCB的临界发火电压,结果见表5~6。

由表5~6可知,小尺寸的硼掺杂SCB的临界发火电压为17V,与典型尺寸的硼掺杂SCB相比下降了4V,磷掺杂SCB的临界发火电压为13V,相比之下磷掺杂SCB仍然更容易发火。

自临界发火电压开始,进行SCB的发火实验,实验结果见表7~8。根据表7~8,得到小尺寸硼掺杂与磷掺杂SCB在47 μ F条件下发火时间、发火能量均值与充电电压的关系。变化趋势与典型尺寸是基本一致的。

表 5 小尺寸硼掺杂 SCB 临界发火电压
Tab.5 Critical ignition voltage of B-doped SCB with small size

序号	充电电压/V	实验结果
1	21	发火
2	18	发火
3	17	发火
4	17	发火
5	16	不发火
6	16	不发火
7	14	不发火

表 6 小尺寸磷掺杂 SCB 临界发火电压
Tab.6 Critical ignition voltage of P-doped SCB with small size

序号	充电电压/V	实验结果
1	15	发火
2	14	发火
3	13	发火
4	13	发火
5	12	不发火
6	12	不发火
7	9	不发火

表 7 小尺寸硼掺杂 SCB 发火时间与发火能量

Tab.7 Function time and firing energy of B-doped SCB with small size

数量	充电电压/V	平均发火时间/ μ s	平均发火能量/mJ
3	17	8.18	0.72
	18	6.60	0.70
	21	4.56	0.64
	24	3.67	0.67
	27	3.67	0.86

表 8 小尺寸磷掺杂 SCB 发火时间与发火能量

Tab.8 Function time and firing energy of P-doped SCB with small size

数量	充电电压/V	平均发火时间/ μ s	平均发火能量/mJ
3	13	18.92	0.93
	16	8.43	0.85
	19	6.42	1.01
	21	5.59	1.13
	24	4.60	1.21
	27	4.18	1.40

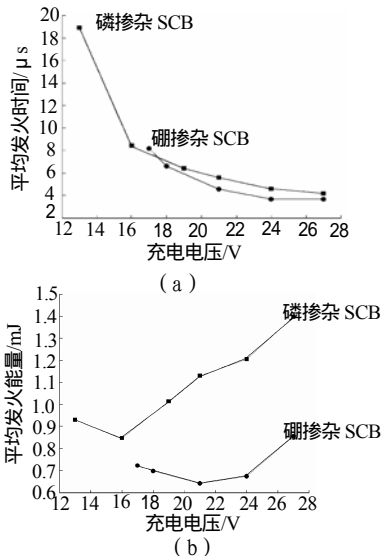


图 5 小尺寸 SCB 发火时间、发火能量与充电电压关系
Fig.5 Function time and firing energy of small size SCB with different voltage

2.3 讨论

由上述实验结果可以看出,在相同尺寸相同掺杂浓度的条件下,磷掺杂SCB的临界发火电压要低于硼掺杂SCB,仅需较小的电压即可使磷掺杂SCB发火,可靠性高;相同发火电压时,磷掺杂与硼掺杂SCB的发火时间接近,且二者的发火时间随电压增高而逐渐缩短,最终趋于稳定值,即瞬发度接近;相同发火电压时,两者的发火能量差别明显,磷掺杂SCB发火能量比硼掺杂SCB的高,其抗静电射频意外发火的能力强,安全性高。磷掺杂SCB的性能明显优于硼掺杂SCB,这是由于两种掺杂半导体的性质决定的。

多晶硅中掺入磷元素,磷为施主杂质,5个价电子中的4个与Si组成4个共价键,多出1个价电子,它不受共价键的束缚,仅被中心的磷原子正电荷吸引,将被施主杂质束缚的电子的能量状态称为施主能级,位于离导带底很近的禁带中,只需很小的能量就能使其挣脱束缚,成为导电电子在晶格中自由运动。类似的,硼原子只有3个价电子,在硅中为受主杂质,能够形成受硼离子束缚的空穴,将被受主杂质所束缚的空穴的能量状态称为受主能级,位于离价带顶很近的禁带中,只需很小的能量就能使其脱离束缚,成为可以导电的自由运动的空穴。

所以,磷掺杂的硅,导电的电子是在导带中,而硼掺杂的硅导电空穴是在价带中,空穴电流实际上是代表了共价键上的电子在价键间运动产生的电流,在相同条件下,电子与空穴的迁移率不相等,前者要大些。而半导体的电阻率与载流子浓度与迁移率成反比^[7],相同的掺杂浓度下载流子浓度相同,但迁移率磷掺杂比硼掺杂要大,使得磷掺杂SCB的正反馈效应更强,功率更大,电爆性能要优于硼掺杂SCB。

而不同尺寸间的比较表明,相对于典型尺寸,小尺寸SCB的临界发火电压、发火时间与发火能量都减少,因为尺寸变小则多晶硅质量变少,使硅汽化所需

能量变少,其它条件不变,自然使得电爆参数变小。

3 结 论

本研究设计了硼与磷两种掺杂元素及典型尺寸和小尺寸的SCB,在电容发火实验条件下,测试研究了掺杂元素对SCB电爆性能参数的影响规律,结果表明:当掺杂物浓度和SCB尺寸相同时,掺杂元素对SCB的临界发火电压影响较大,磷掺杂SCB的临界发火电压低于硼掺杂SCB;相同发火电压下,磷掺杂SCB和硼掺杂SCB的发火时间相差不多,掺杂元素对SCB发火时间影响较小,而磷掺杂SCB发火能量要比硼掺杂SCB的高。研究结果表明磷掺杂比硼掺杂SCB具有更好的可靠性和安全性。

参考文献:

- [1] 叶迎华.火工品技术[M].北京:北京理工大学出版社,2007.
- [2] Myung-II Park, Hyo-Tae. Comparison of plasma generation behaviors between a single crystal semiconductor bridge (single-SCB) and a poly-silicon semiconductor bridge (poly-SCB) [J]. Sensors and Actuators ,2004(115):104-108.
- [3] 李勇,周彬,秦志春,等.火工品用复合半导体桥技术的研究与发展[J].含能材料,2013(03): 387-393.
- [4] Bickes R W, Grubelich M C, Harris S M, et al An over view of semiconductor bridge, SCB, application at sandia national laboratories [R]. AIAA 95-2549, 1995.
- [5] 毛国强.低发火能量、高安全性半导体桥的研究[D].南京:南京理工大学,2007.
- [6] 周彬,秦志春,毛国强.半导体桥长宽比对其发火性能的影响[J].南京理工大学学报(自然科学版),2009(02): 235-237.
- [7] 刘恩科,朱秉升,罗晋生.半导体物理学[M].北京:国防工业出版社,2010.