

半导体桥 (SCB) 的研究

周 蓉 岳素格 秦卉芊 张玉才 胡思福

(电子科技大学微电子科学与工程系 成都 610054)

摘要 目前常用的点火器 Ni-Cr 金属桥丝(热桥丝)体积较大,点火能量高(几十毫焦),作用时间长(几毫秒),且易误触发。本文中采用半导体器件和集成电路技术研制的新一代点火器——半导体桥(SCB)体积小(为热桥丝三十分之一),结构上兼有 Si 桥区倒圆点和 TiAl 金属导体倒圆点两大特点,其点火临界能量可降低到 3~5mJ,作用时间可缩短到 5 μ s,从而能快速产生热等离子体来引爆猛炸药。同时,SCB 还具有较高的可靠性和安全性,其安全电流大于 1.5A。本文分析了 SCB 工作原理,并研究了 SCB 的结构对临界能量、点火作用时间、可靠性和安全电流的影响,最后对试验结果进行了讨论。

EEACC: 2550E, 2560B

1 前言

金属桥丝(热桥丝)点火器常用于点燃烟火剂、燃料等爆炸物。当加上 3~5A 的电流,通过几毫秒时间加热,桥丝温度可上升到 900K 左右,并将紧压在桥上面的炸药柱加热引爆。但是金属桥丝具有体积大,发火临界能量高,可靠性和抗干扰能力差,作用时间长等缺点,在国际、国内军事装备的使用中出现误触发的几率较大,发火性能差,易造成军事装备和人员的损伤,愈来愈不适应现代军事装备对点火器快速、低能、安全可靠的需求。因此,研制出性能优良的新一代点火器 SCB 具有重大的现实意义。

据文献报道^[1],国外采用半导体技术研制成功的 SCB,在低能脉冲(3~5mJ),短时间(20 μ s)内可产生高温等离子体,其温度高达 4000K 以上,从而能快速引爆炸药。点火器作用时间的长短,对相关军事装备的性能有重要影响,而金属导体在桥区不同部位形成的倒圆点结构可显著地缩短 SCB 桥的作用时间。SCB 的特性与热桥丝比较如表 1。本文研制的 SCB 在结构上具有 Si 桥区倒圆点和 TiAl 金属导体倒圆点的特点,使点火的临界能量可降低到 3~5mJ,作用时间可缩短到 5 μ s。

周 蓉 女,1968 年出生,讲师,在职博士生,主要研究方向:半导体器件与工艺
岳素格 女,1969 年出生,硕士,从事于集成电路 CAD
胡思福 男,1938 年出生,教授,主要研究方向:半导体器件与微细加工技术
1997-07-17 收到,1997-10-17 定稿

表 1 半导体桥与常规热桥丝的性能比较^[1]

参数\类型	常规热桥丝	半导体桥
阻值/ Ω	1	1
桥的体积/ cm^3	275×10^{-8}	7.6×10^{-8}
临界电流/A	3.5	11
临界能量/mJ	24.5	2.8
不发火电流/A	1	2.2
作用时间/ μs	2000	50

2 SCB 的作用机理

一般引爆炸药方式有两种,一种是由热传导方式使炸药温度升高至发火温度,另一种是具有高能量的冲击波冲击炸药引爆。目前常用的点火器是 Ni-Cr 或 Au 金属桥丝,其电阻是正温度系数。温度升高,电阻值增加,在恒定的电源电压下,

由于电阻值随温度的升高而加大,因而流过电阻的电流相应地降低,使得桥丝的加热速度很慢。并且, Ni-Cr、Au 金属材料的熔点高,汽化温度高,需要很大的外加能量和较长的时间才能形成高温等离子体。因而,1 欧姆 Ni-Cr 金属桥丝在 3~5A 电流下,只能起熔断丝式的加热作用,通过热传导来引爆炸药。

由图 1^[2]可见,随温度升高,高掺杂半导体材料电阻变化不大,略有升高。当温度高于 800K 后,其电阻变为负温度系数。该性质使得高掺杂半导体桥 SCB 在加热过程中易形成温度升高,电阻略有下降,热功率增大的正反馈效应。Si 的熔点为 1410, Ni(80%)-Cr(20%) 的熔点为 1500,并且在同样的温度下, Si 的蒸气压比 Ni 的蒸气压大 20 倍^[3]。硅、多晶硅材料中固态原子转换为带电的汽态粒子所需的电离能量远远低于 Au、Ni-Cr 之类的金属材料。因此,在高温下,由高掺杂半导体材料形成的 SCB 易形成高温等离子体放电,产生高能冲击波来引爆炸药。

由图 2(见图版 I),当有电流通过时,由于桥区中部金属倒圆点和硅桥区倒圆点共同的作用,使得倒圆点区域桥体的电阻值比四周小,因而电流首先集中在倒圆点区域,使桥中间区域温度迅速升高。当温度高于 800K,桥电阻进一步下降,电流更集中,温度进一步升高,从而形成正反馈效应,使中间高温区域快速熔化。硅材料的另一重要特性是熔化时电阻率明显下降,硅熔化的电阻率(ρ_l)与固态的电阻率(ρ_s)的之比为 $1 \sim 10^{14}$ 。因而熔化桥区加热速度比固态桥区快,汽化也在中间首先发生。这样,倒圆点附近形成的高温区通过热量的传递、辐射和载流子的热扩散运动,使中心高温区的热量迅速向 SCB 四周扩展,熔化区向桥两侧靠近,汽化进一步产生至全部桥汽化。此时,桥将产生一个较弱的气态离子层。因气态离子数目较少,电阻比较大。当电流流过气体层时,电离加强,电阻下降,最终产生一个较强的高温等离子层,在后期放电(LTD)时形成高温等离子体辐射放电,从而引爆炸药。

图 3(见图版 I)为 24V, 10A 条件下获得的 SCB 发火现象、采样波形以及桥区作用后图片。从

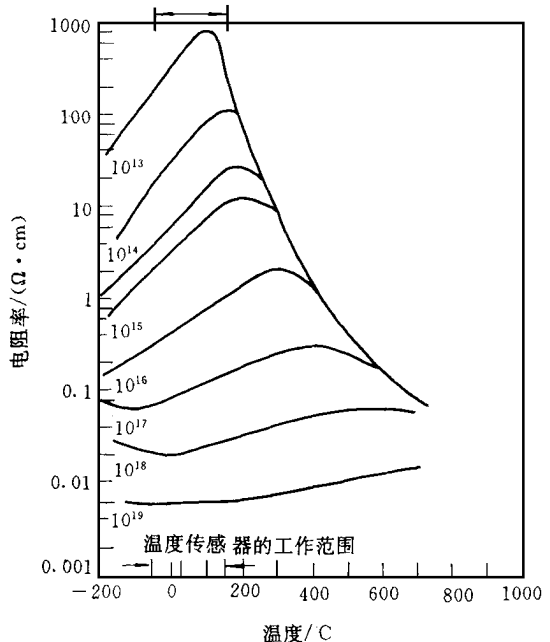


图 1 硅的电阻率与掺杂浓度及温度的关系曲线

图可见, 在几个微秒的时间内, 整个桥区 and SCB 电极区均参与高温等离子放电

3 SCB 的设计

为降低 SCB 点火的临界能量, 缩短其作用时间, 提高其发火可靠性, 本文从以下三个方面进行考虑

首先是选择合适的衬底材料 国外的 SCB 采用蓝宝石衬底^[1], 原因在于蓝宝石具有好的绝缘性以及好的热导率, 可获得较大的安全电流 但蓝宝石成本高, 且工艺上有一定难度, 因而本文选用单晶硅衬底材料 先在单晶硅上生长一层 SiO_2 , 再外延生长多晶硅, 该结构既保证了电绝缘, 防止了射频干扰, 还具有良好的导热性

其次是三维尺寸的确定 多晶硅平均掺杂浓度选为 $7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 对应的电阻率为 $7.6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. 常规点火器的电阻为 1Ω

由 $R = \rho \frac{L}{Wt}$, 其中 L 为桥长; W 为桥宽; t 为桥厚度, 得出:

$$\frac{Wt}{L} = \frac{\rho}{R} = 7.6 \times 10^{-4} \text{cm}$$

对于桥区三维尺寸的选则, 除受 1Ω 标准桥电阻的限制外, 还与 SCB 的安全电流以及临界能量^[5]有关 设 t 为 $2 \mu\text{m}$, 则 W/L 为 3.8, 而 W 和 L 的选择与不同炸药所需的临界能量有直接关系 为此, 在 2mm^2 芯片上设计了两种尺寸不同的半导体桥:

大桥: $L = 100 \mu\text{m}$ $W = 380 \mu\text{m}$ 小桥: $L = 70 \mu\text{m}$ $W = 270 \mu\text{m}$

最后是电极系统的设计 由于 Ti 与多晶硅接触电阻小^[6], 因而本文中 SCB 的电极系统采用 Al/Ti/Si 结构, 有利于减少加热能量的损耗 图 4 (见图版 D) 为 SCB 的结构图

4 SCB 实验结果讨论

临界能量与 SCB 的体积有关, 只有在一定的体积下, SCB 才能产生足够的等离子体来引爆炸药 在本设计中, SCB 所需的临界能量 E 计算为 3mJ . 考虑到多种损耗, E 应大于 3mJ . 由于本设计中采用 Si 桥区倒圆点和 Ti-Al 金属导体倒圆点结构, 使得桥区局部电阻较小 加电时该区域首先熔化、汽化, 再通过热传导、辐射以及载流子的热运动, 使整个桥区熔化、汽化 这样就大大降低了临界能量, 缩短了作用时间

临界能量和作用时间除与上述因素有关外, 还与向 SCB 提供能量的触发电源有关 因此, 应尽量降低触发电路的上升时间, 减小电路中除 SCB 以外的其余元器件、引线的附加电阻 试验中测定的 SCB 的临界能量在 $3 \sim 5 \text{mJ}$ 之间, SCB 的作用时间在 $5 \sim 8 \mu\text{s}$ 之间, 比目前常用的金属桥丝的作用时间 ($1 \sim 3 \text{ms}$) 大大缩短 表 2 为在不同条件下测定的 SCB 的临界能量和作用时间

SCB 作用时间比金属桥丝缩短了两个数量级, 意味着火点同步性的提高 由多路同时采样电压波形发现, 在 LTD 时产生的两个尖峰的最大间隙不超过 900ns , 因而可确

表 2 实验数据

条件\参量	临界能量/mJ	作用时间/ μs
24V, 10A	4.55	7.9
27V, 10A	4.23	5.8
30V, 10A	4.60	5.1

定不同步时间小于 $1\mu\text{s}$ 图 5(见图版 D)为 4 个桥并联发火的现象及其电压波形

安全试验中测定的 SCB 的安全电流大于 1.5A. 通过优化 SCB 的工艺,改进封装技术,可以提高 SCB 的安全电流至 2.2A.

5 结 论

由于采用了 Si 桥区和 TiAl 金属导体两层倒圆点结构,本文设计的半导体桥 SCB 具有临界能量低、体积小、作用时间短、同步性好和可靠性高等优点,在低电压下即可引爆炸药.除此以外,SCB 桥区作用时发出的强烈的蓝白色光和导电的等离子体可用于脉冲光源和高速电能开关.同时,SCB 还可用于等离子体源和促进化学反应的能量源.

进一步完善的设计将把 SCB 和密码电路以及触发电路集成在一起,使点火装置灵巧化、小型化、智能化,更安全可靠.

参 考 文 献

- [1] D. A. Benson, M. E. Larsen *et al*, *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(5): 1622
- [2] Preiswerte Präzision, *Elektronik*, 1989, **8**: 32
- [3] 钱振型, 固态电子学中的等离子体技术, 北京: 电子工业出版社, 1987, 第二章
- [4] G. J. Galvin, M. O. Thompson *et al*, *Phys. Rev.*, 1979, **B27**: 1079
- [5] 张丙辰编译, 半导体技术与火工品译文集, 西安 213 所, 1991, **1**: 56
- [6] 王阳元, 关旭东等著, 集成电路工艺基础, 北京: 高等教育出版社, 1991, 第九章

Study of Semiconductor Bridge

Zhou Rong, Yue Suge, Qing Huiqian, Zhang Yucai, Hu Sifu

(Department of Microelectronic Science & Engineering of UESTC, Chengdu 610054)

Received 17 July 1997, revised manuscript received 17 October 1997

Abstract Commonly used to ignite energetic powders such as pyrotechnics, propellants etc. are small metal bridge-wires, which have defects such as large volume, high input energy, long function time and instability. In this paper, we describe a new means for igniting explosive materials using a semiconductor bridge (SCB), whose structure has waist points of the bridge along the current direction and incorporates points on the aluminum lands. This SCB, which is one thirtieth smaller in volume than a conventional hot wires, can decrease input energy to 3~5mJ, shorten function time to 5~8 μs and can pass 1.5A current in 5 seconds without function. We describe the SCB layout and analyze its mechanics emphasizing on its input energy and function time. The experimental results are also discussed.

EEACC: 2550E, 2560B