

小尺寸 SCB 裸桥与涂 LTNR 时的电爆发火特性

樊志伟¹, 严楠¹, 贺翔¹, 张良¹, 李朝振¹, 张威², 李宋²

(1. 北京理工大学爆炸科学重点实验室, 北京 100081;

2. 北京大学微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871)

摘要:为了研究小尺寸半导体桥 (Semiconductor Bridge, SCB) 裸桥和涂斯蒂芬酸铅 (Lead Styphnate, LTNR) 时的电爆发火特性, 在 22 μF 电容放电条件下, 对小尺寸磷掺杂单晶硅 SCB 裸桥与涂 LTNR 时的电爆、后期放电 (Late Time Discharge, LTD) 过程的能量及时间数据进行了测试和对比分析。结果表明: 裸桥和涂药 SCB 在 8 V、12 V、16 V、20 V 和 24 V 电压下电爆能量的平均值十分接近, 裸桥和涂药 SCB 电爆能量值与电压大小无关。随着电压的提高, 裸桥和涂药 SCB 的 LTD 能量及时间按照指数规律上升, 发火之后的掺杂单晶硅层汽化的面积会不断扩大。裸桥和涂药 SCB 所有电爆发火样品的电爆能量平均值分别为 34.29 μJ 和 34.27 μJ , LTNR 涂药在电爆过程中吸收能量较少, 对电爆能量的影响很小。

关键词: 半导体桥; 电爆; 斯蒂芬酸铅; 发火能量; 发火时间

本文引用格式: 樊志伟, 严楠, 贺翔, 等. 小尺寸 SCB 裸桥与涂 LTNR 时的电爆发火特性[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(09): 29-35.

Citation format: FAN Zhiwei, YAN Nan, HE Xiang, et al. Electro-Explosive Ignition Characteristics of Bare and LTNR Coated Small-Sized SCB[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(09): 29-35.

中图分类号: TJ450.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)09-0029-07

Electro-Explosive Ignition Characteristics of Bare and LTNR Coated Small-Sized SCB

FAN Zhiwei¹, YAN Nan¹, HE Xiang¹, ZHANG Liang¹,
LI Chaozhen¹, ZHANG Wei², LI Song²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Laboratory of Micro / Nano Processing Technology at Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to study the electro-explosive characteristics of bare and Lead styphnate (LTNR) coated small-sized Semiconductor bridge (SCB), the electro-explosive ignition characteristics of P-doped single-crystal silicon SCB was studied under 22 μF capacitor discharge ignition system, based on the energy and time data of electric explosion, Late time discharge (LTD) and ignition. Results show that electro-explosive energy of bare and LTNR coated small-sized SCB at 8 V, 12 V, 16 V, 20 V and 24 V is similar and isn't related to voltage value. As the voltage increases, the LTD energy and LTD time of bare and LTNR coated SCB increase exponentially, the vaporized area of the P-doped single-crystal silicon layer will expand after firing. The average electro-explosive energy of all electro-explosive bare bridge and LTNR coated SCB samples is 34.29 μJ and 34.27 μJ , respectively, LTNR absorbed less energy during the

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2019-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1530135)

作者简介: 樊志伟 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 微型传爆序列研究, E-mail: fanzhiwei_2009@163.com。

通讯作者: 严楠 (1960—), 男, 教授, 主要从事新型火工品设计研究, E-mail: yn@bit.edu.cn。

electric explosion process and had a small impact on the value of electro-explosive energy.

Key words: semiconductor bridge; electric explosion; lead styphnate; ignition energy; ignition time

半导体桥(semiconductor bridge, SCB)具有低发火能量、高安全性、高可靠性、瞬发度高以及能与数字逻辑电路组合等优点^[1],大量用于数字化或智能化武器、卫星姿态控制、弹药弹道修正、民用安全气囊和爆破工程等^[2],成为微型点火和传爆序列芯片研究和应用领域的热点。Benson D A等^[3]研究了SCB从熔化汽化到电爆产生等离子体的过程,将电爆之后的等离子体加热过程定义为后期放电(late time discharge, LTD)过程;Lee K等^[4]研究了SCB产生等离子体时两端电压随时间的变化情况并发现有两个电压峰,其中第一个峰值对应于SCB汽化前的硅桥加热,第二个峰值对应于SCB等离子体的产生;J Kim等^[5]的研究表明,如果SCB的电极发生烧蚀,电极及下面的掺杂硅层都会参与电爆;王文等^[6-9]研究了SCB芯片发火过程中的电压、电流、电阻及发火能量变化特性,测量了SCB等离子体的温度等。以上文献都是基于大尺寸SCB进行的研究,针对小尺寸SCB的电爆发火能量及时间特性的研究比较少,为了研究在电容放电条件下LTNR涂药及电容充电电压对小尺寸SCB电爆发火特性的影响规律,本文主要对小尺寸SCB裸桥和涂有斯蒂芬酸铅(LTNR)药剂的小尺寸SCB的不同发火能量和相关时间特性进行了试验研究。

1 试验过程

为了研究在电容放电条件下LTNR涂药及电容充电电压对小尺寸SCB电爆发火特性的影响规律,设计裸桥与涂药SCB在相同规格电容放电条件下进行电爆发火试验。

试验使用22 μF 钽电容对涂药SCB发火芯片进行发火感度试验,感度实验方法为Neyer-D最优化法,样本量为20发,得到涂药SCB发火芯片50%发火电压为4.49 V,99.9%发火电压为5.9 V,因此采用8 V、12 V、16 V、20 V和24 V作为22 μF 电容放电条件下SCB发火芯片电爆发火试验的充电电压,每个电压打6发样品,3发是裸桥,3发是涂药之后的SCB芯片,利用是德DSOX4104A数字示波器监测记录发火过程的电信号。

1.1 试验样品情况

试验采用的是“双V形”结构的单晶硅SCB,掺杂元素为磷,掺杂浓度为 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,其结构示意图及显微图像如图1,此规格单晶硅SCB桥长 L 为20 μm ,桥宽 W 为50 μm ,桥区厚度 H 为4 μm ，“V形角”角度为60°,用回流焊将单晶硅SCB的封装结构通过回流焊焊接在PCB板上,SCB发火芯片的整体图像如图2(a)所示,所有试验样品的平均电阻为4.59 Ω ,标准差为0.37 Ω 。

涂药SCB发火芯片所采用的涂药为粒度70 μm 的斯蒂芬酸铅(LTNR),涂药量约为2 mg,涂药前后的SCB发火芯

片实物如图2所示。

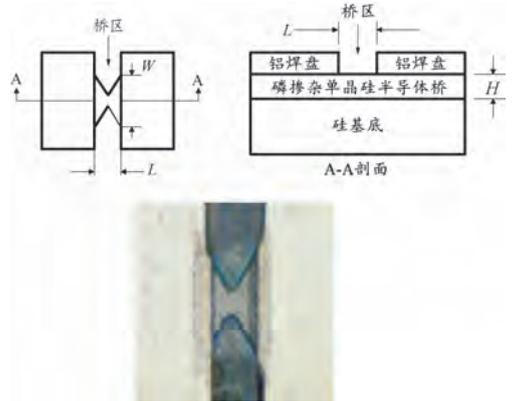


图1 磷掺杂单晶硅SCB的结构示意图及实物显微图像

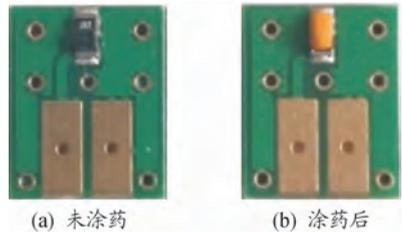


图2 涂药前后的SCB芯片实物图像

1.2 试验装置及原理

试验发火装置由储能放电仪、电容、数字示波器及配套的电流、电压光电探头组成,试验装置原理如图3所示,图中 C 为电容、 R_0 为试验样品。

试验采用钽电容作为充电电容,它具有漏电流小、内阻小、放电快、能量利用率高的特点^[10],试验电路连接完成后,使用南京理工大学研制的ALG-CN1储能放电仪对电容充电,充电至预定电压后,闭合开关,使电容对SCB芯片放电。使用是德DSOX4104A数字示波器(1 GHz、5 GSa/s、带宽200 MHz、最高波形更新速率>1 000 000个波形/s)记录电信号波形,配套的N2894A电压探头监测SCB芯片两端电压信号,N2783B电流探头监测回路电流信号,索雷博DET10A/M光电探头监测发火过程中SCB发火产生的光信号。

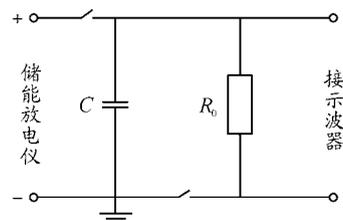


图3 试验装置原理示意图

2 结果与讨论

2.1 裸桥及涂药 SCB 电爆发火信号特征

裸桥和涂药 SCB 的爆发火信号图像如图 4、图 5 所示, 爆发火之后的桥区显微图像如图 6 所示。

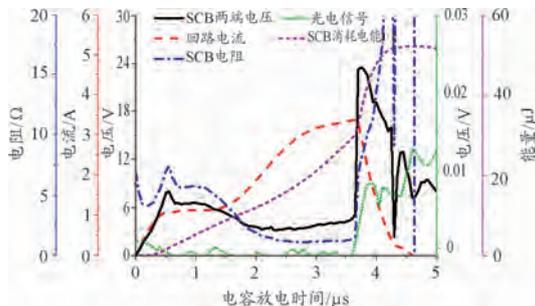
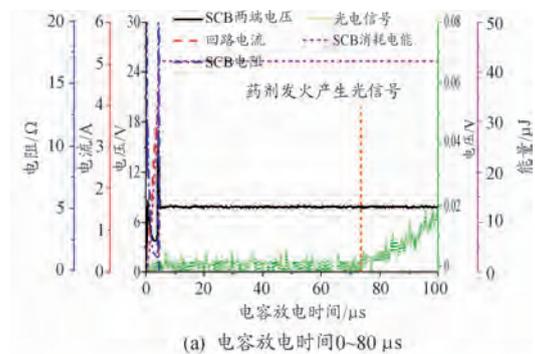
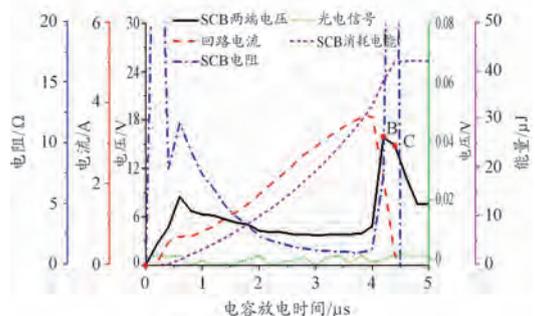


图4 裸桥电爆发火信号图像
(电容规格:22 μF , 充电电压:8 V)



(a) 电容放电时间0~80 μs



(b) 电容放电时间0~5 μs

图5 LTNR 涂药的 SCB 电爆发火信号图像
(电容规格:22 μF , 充电电压:8 V)

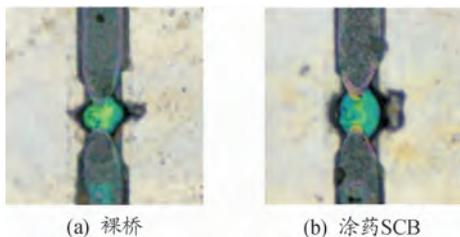


图6 SCB 电爆发火后的桥区显微图像

图 4 和图 5(b) 中电压曲线都存在二次峰, 电压、电流、电阻、能量曲线的变化趋势一致, 其中能量曲线是将电流曲线与电压曲线的乘积与时间积分得到的。唯一不同的是光电信号的曲线, 图 4 中裸桥电爆的光信号曲线在电压的二次峰处出现陡升, 说明裸桥在电压二次峰的位置发生电爆产生等离子体进而产生光信号, 它记录的是裸桥的电爆时间。图 5(a) 中涂药 SCB 的光信号曲线在 71 μs 左右出现陡升, 它记录的是涂药 SCB 的爆发火延滞期。从图 6 中可以看出, 在电压为 8 V 时, 两者电爆之后的桥区表现形貌区别不大, 与图 1 中 SCB 裸桥显微图像相比, 桥区以“双 V 形”的顶点为中心发生电爆, SCB 两侧铝焊盘部分也在电爆之后出现部分汽化, “双 V 形”SCB 之下硅基底的颜色也因为 SCB 电爆产生的高温等离子体而发生了变化, 裸桥和涂药 SCB 桥区显微图像基本相同。

以涂药 SCB 电爆发火后的电信号图像图 5(b) 为例进行进一步分析。图 5(b) 中电压曲线存在明显的二次峰, 在电压曲线达到二次峰的时候, SCB 桥区电爆产生等离子体, 之后桥区电阻值升至无穷大, 桥区断开, 电流值降为零。从电容开始放电到桥区断开的这段时间内, 电阻曲线经历了一系列的变化, 从图 5(b) 中的电阻曲线可以看出, 电压与电流的比率在很早就非常大, 这并不是真正的电阻, 电压与电流的较大比率是由电路中的电感引起的, 并且只是在极早期数据中始终出现的初始瞬态^[11], 初始 SCB 电阻约为 4.47 Ω 。电阻单调增加至 0.6 μs 的第一个峰值 11.72 Ω , 在 0.6 μs 之后, 电阻值迅速下降, 这是因为当温度高于 800 K 后, SCB 变为负温度系数^[12]。桥区电阻在 2~4 μs 之间达到最低值 1.2 Ω 左右, 由于硅熔化的电阻率约为固态电阻率的 1/10^[13], 可以判断在 2~4 μs 之间, SCB 桥区中心已经熔化, 进而在 4.2 μs 左右迅速汽化并电离产生等离子体, 4.2 μs 之后发生 LTD 过程^[14], 即产生等离子体之后的等离子体加热过程, 此过程一直持续到电流值降为 0。

熔化的 SCB 汽化形成高温高压的等离子体, 灼热的等离子体迅速渗透到炸药中, 通过微对流传热将热量传递给炸药, 使炸药表面的温度升高达到其着火点而点燃。

如图 5(b) 所示, 将电压曲线分为两段:

第一段 A-B, 对应从电容开始放电到 SCB 电爆产生等离子体的过程, 称这段时间为电爆时间 $t_{\text{电爆}}$, SCB 电爆能量 $E_{\text{电爆}}$ 为 $t_{\text{电爆}}$ 时间段内电流与电压的乘积对时间的积分;

第二段 B-C, 对应 SCB 电爆产生等离子体之后的整个等离子体加热过程, C 点对应的电流值为零, B-C 段时间称为 LTD 时间 t_{LTD} , 后期放电能量 E_{LTD} 为 t_{LTD} 时间段内电流与电压的乘积对时间的积分。

将 A-C 段整个对应 SCB 从电容开始放电到回路中电流值为 0 的过程, 将 A-C 段时间称为 SCB 断桥时间 $t_{\text{断桥}}$, SCB 爆发火能量 $E_{\text{爆发火}}$ 为 $t_{\text{断桥}}$ 时间段内电流与电压的乘积对时间的积分, 显然 $t_{\text{断桥}}$ 为 $t_{\text{电爆}}$ 与 t_{LTD} 之和, $E_{\text{爆发火}}$ 为 $E_{\text{电爆}}$ 与 E_{LTD} 之和。

发火过程的能量利用率 $\omega_{\text{利用}}$ 为在发火过程中消耗在 SCB 发火芯片的能量与电容中的总能量的比值。能量损耗率 $\omega_{\text{损耗}}$ 为发火过程中消耗在除了 SCB 发火芯片之外的回路电阻中的电能与电容中总能量的比值。

从图 4 和图 5(b) 中得到裸桥和涂药 SCB 的电爆能量及时间数据, 裸桥数据的角标为 b , 涂药 SCB 的电爆发火能量及时间数据的角标为 c 。得到 $t_{b\text{断桥}} = 4.30 \mu\text{s}$, $t_{b\text{电爆}} = 3.75 \mu\text{s}$, $t_{b\text{LTD}} = 0.55 \mu\text{s}$, $E_{b\text{发火}} = 51.80 \mu\text{J}$, $E_{b\text{电爆}} = 36.21 \mu\text{J}$, $E_{b\text{LTD}} = 15.59 \mu\text{J}$, $\omega_{b\text{利用}} = 7.36\%$, $\omega_{b\text{损耗}} = 1.20\%$ 。 $t_{c\text{断桥}} = 4.60 \mu\text{s}$, $t_{c\text{电爆}} = 4.20 \mu\text{s}$, $t_{c\text{LTD}} = 0.40 \mu\text{s}$, $E_{c\text{发火}} = 42.15 \mu\text{J}$, $E_{c\text{电爆}} = 38.16 \mu\text{J}$, $E_{c\text{LTD}} = 3.99 \mu\text{J}$, $\omega_{c\text{利用}} = 5.99\%$, $\omega_{c\text{损耗}} = 1.85\%$ 。

2.2 裸桥及涂药 SCB 电爆发火能量及时间特性分析

22 μF 电容放电条件下, 8 V、12 V、16 V、20 V 和 24 V 等 5 个电压下裸桥和涂药 SCB 发火之后的代表性桥区显微图像如图 7 所示。将 8 V、12 V、16 V、20 V 和 24 V 每个电压下 3 发裸桥和 3 发涂药 SCB 的数据分别平均得到裸桥的电爆发火能量及时间的数据如图 8 ~ 图 12 所示。

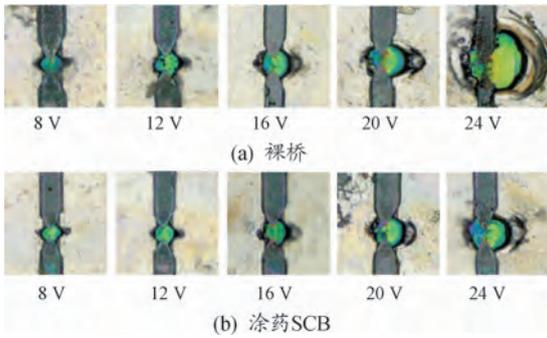


图 7 不同电压下裸桥和涂药 SCB 发火后的显微图像

2.2.1 电爆能量及电爆时间特性分析

裸桥的电爆能量 $E_{b\text{电爆}}$ 和涂药 SCB 的电爆能量 $E_{c\text{电爆}}$ 与电压的关系如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 裸桥在 5 个电压下的电爆能量平均值分别为 37.08 μJ 、32.51 μJ 、33.30 μJ 、34.90 μJ 、33.66 μJ , 涂药 SCB 在 5 个电压下的电爆能量平均值分别为 34.68 μJ 、35.59 μJ 、34.63 μJ 、34.23 μJ 、32.23 μJ 。裸桥和涂药 SCB 在 8 ~ 24 V 电压下电爆能量的平均值十分接近, 表明裸桥和涂药 SCB 电爆能量值与电压大小无关。裸桥和涂药 SCB 所有电爆发火样品的电爆能量平均值分别为 34.29 μJ 和 34.27 μJ , 说明在 SCB 电爆产生等离子体之前, 从 SCB 向药剂中传递的热量很少, 药剂不会影响到 SCB 的电爆能量。

裸桥电爆时间 $t_{b\text{电爆}}$ 和涂药 SCB 的电爆时间 $t_{c\text{电爆}}$ 与电容充电电压的关系曲线基本一致, 拟合曲线分别为:

$$t_{b\text{电爆}} = 17.63\exp(-U/4.29) + 1.16 \quad (1)$$

R-Square 系数为 0.996 62。

$$t_{c\text{电爆}} = 15.17\exp(-U/4.82) + 1.04 \quad (2)$$

R-Square 系数为 0.997 87, 随着电压的升高, 电爆时间按照指数规律下降, 这是因为电压越高, 放电回路的时间常数不变, 所以电容单位时间内能够释放更多的能量, 而且固定尺寸规格的 SCB 电爆所需能量不随电压变化, 所以达到 SCB 电爆所需要的时间越来越短。

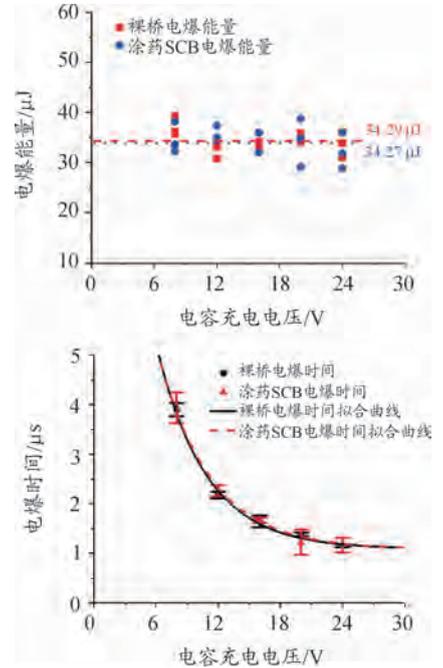


图 8 $E_{b\text{电爆}}$ 、 $E_{c\text{电爆}}$ 、 $t_{b\text{电爆}}$ 、 $t_{c\text{电爆}}$ 与电容充电电压的关系曲线

2.2.2 后期放电能量及时间特性分析

裸桥 LTD 能量 $E_{b\text{LTD}}$ 及 LTD 时间 $t_{b\text{LTD}}$ 和涂药 SCB 的 LTD 能量 $E_{c\text{LTD}}$ 及 LTD 时间 $t_{c\text{LTD}}$ 与电压的关系如图 9 所示, 随着电压的提高, $E_{b\text{LTD}}$ 和 $E_{c\text{LTD}}$ 时间按照指数规律上升, 经过拟合得到的 $E_{b\text{LTD}}$ 与电压的关系曲线为:

$$E_{b\text{LTD}} = 0.0029\exp(U/1.85) + 36.01 \quad (3)$$

R-Square 系数为 0.999 11。 $E_{c\text{LTD}}$ 与电容充电电压的关系曲线为:

$$E_{c\text{LTD}} = 0.069\exp(U/2.88) + 12.41 \quad (4)$$

R-Square 系数为 0.996 95。 $t_{b\text{LTD}}$ 和 $t_{c\text{LTD}}$ 与电容充电电压的关系拟合曲线分别为:

$$t_{b\text{LTD}} = 1.32\text{E} - 5\exp(U/1.65) + 0.94 \quad (5)$$

R-Square 系数为 0.999 46。

$$t_{c\text{LTD}} = 0.02\exp(U/4.46) + 0.33 \quad (6)$$

R-Square 系数为 0.996 81。电爆产生的等离子体经过加热, 高温高压等离子体的温度超过了铝电极的沸点, 电极下面的掺杂单晶硅也发生汽化。J Kim 等^[15]的研究也表明, 如果电极发生烧蚀, 电极及下面的掺杂硅层都会参与电爆, 所以 LTD 能量上升会导致出现图 7 中裸桥和涂药 SCB 的掺杂单晶硅层发生电爆的面积不断扩大的现象, 电爆产生的等离子体的温度也会相应地上升^[6]。如图 9 所示, 当电压小于 16 V 时, 裸桥的 LTD 能量及 LTD 时间曲线高于裸桥, 但相差较

小;当电压大于 16 V 时, E_{bLTD} 及 t_{bLTD} 曲线开始大幅超过 E_{cLTD} 及 t_{cLTD} 曲线。电压为 20 V 和 24 V 时,图 7 中裸桥掺杂单晶硅层发生电爆的面积比涂药 SCB 掺杂单晶硅层发生电爆的面积明显要大很多,这是因为涂药 SCB 电爆产生的等离子体会与药剂发生作用,药剂的存在阻止了等离子体的进一步加热和铝焊盘下的掺杂单晶硅层进一步电爆,裸桥就不存在药剂的阻碍,桥两端有高压存在并不断向包含等离子体的空气放电,直到空气不再被击穿为止^[15], Jongdae Kiln 等^[5,16-17]也通过研究发现,对于铝焊接区,SCB 等离子体的电子密度随着输入能量的增加而增加,电压越高铝焊盘下参与电爆的 SCB 面积就大于涂药 SCB,所以在 LTD 阶段裸桥消耗的能量就比涂药 SCB 更多,加热时间就会更长,产生的等离子体也会更多。

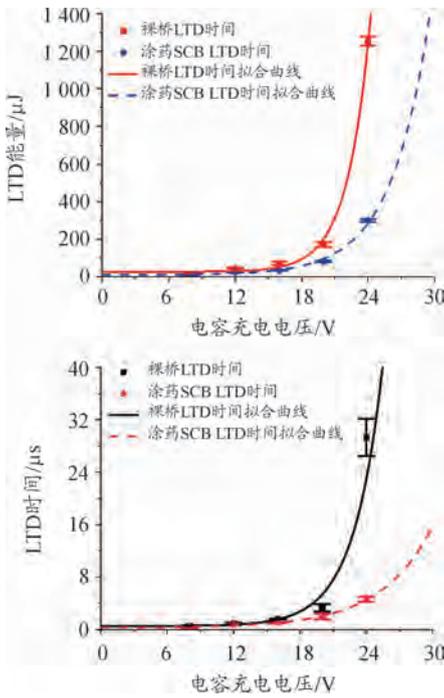


图 9 E_{bLTD} 、 E_{cLTD} 、 E_{bLTD} 、 E_{cLTD} 与电容充电电压的关系曲线

2.2.3 发火能量及时间特性分析

裸桥发火能量 $E_{b发火}$ 及断桥时间 $t_{b断桥}$ 与电容充电电压的关系如图 10 所示, $E_{b发火}$ 与电容充电电压的拟合关系曲线为:

$$E_{b发火} = 0.15 \exp(U/3.21) + 44.78 \quad (7)$$

R-Square 系数为 0.997 7,涂药 SCB 发火能量 $E_{c发火}$ 与电容充电电压的关系拟合曲线为:

$$E_{c发火} = 0.003 \exp(U/1.86) + 70.38 \quad (8)$$

R-Square 系数为 0.999 3。涂药 SCB 断桥时间 $t_{c断桥}$ 与电容充电电压的关系拟合曲线为:

$$t_{c断桥} = 10.89 - 1.11U + 0.04U^2 \quad (9)$$

R-Square 系数为 0.978 39,其断桥时间的最小值为 2.56 μs ,此时电压为 15 V。

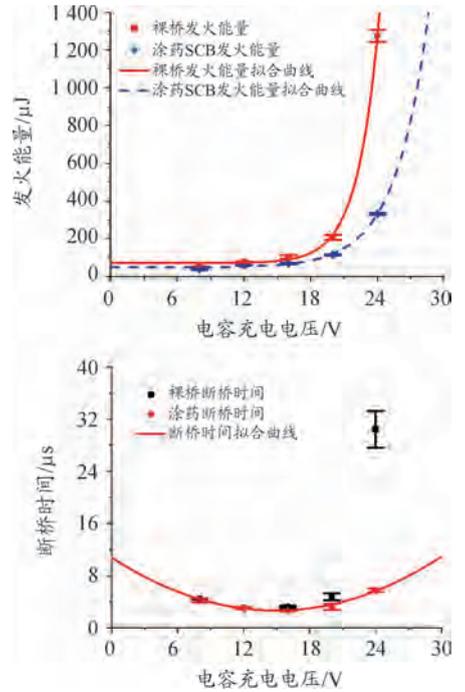


图 10 $E_{b发火}$ 、 $E_{c发火}$ 、 $t_{b断桥}$ 和 $t_{c断桥}$ 与电容充电电压的关系曲线

$E_{b发火}$ 和 $E_{c发火}$ 随着电压的提高按照指数规律上升,这是因为 SCB 发火芯片的发火能量等于电爆能量与 LTD 能量之和,而裸桥和涂药 SCB 的电爆能量不随电压变化,所以裸桥和涂药 SCB 的发火能量的变化趋势与两者 LTD 能量变化趋势一致。在电压小于 16 V 时,裸桥发火能量大于涂药 SCB 发火能量,电压大于 16 V 时,由于发火能量等于电爆能量与 LTD 能量之和,断桥时间等于电爆时间与 LTD 时间之和,此时裸桥的 LTD 能量及 LTD 时间开始大幅超过涂药 SCB,因此裸桥的发火能量及断桥时间在电压大于 16 V 之后大幅超过涂药 SCB。

将裸桥 $t_{b断桥}$ 、 $t_{b电爆}$ 、 t_{bLTD} 、 $E_{b发火}$ 、 $E_{b电爆}$ 、 E_{bLTD} 和涂药 SCB 的 $t_{c断桥}$ 、 $t_{c电爆}$ 、 t_{cLTD} 、 $E_{c发火}$ 、 $E_{c电爆}$ 、 E_{cLTD} 进行统计,结果图 11 所示。由于断桥时间为电爆时间与 LTD 时间之和,在电压小于 18 V 时,电爆时间是断桥时间的主要组成部分,在电压大于 18 V 时,电爆时间低于 LTD 时间,LTD 时间成为断桥时间的主要组成部分。

2.2.4 涂药 SCB 发火延滞期特性分析

涂药 SCB 的发火延滞期就是从电容通电到光电探头采集到药剂发火的光信号的时间,涂药 SCB 发火芯片的发火延滞期数据如图 12 所示,拟合曲线方程为:

$$t_{发火延滞期} = 123.17 \exp(-U/4.83) + 50.66 \quad (10)$$

R-Square 系数为 0.998 51,随着电容充电电压的升高,发火延滞期按照指数规律下降,最后趋于定值。随着电容充电电压的升高,SCB 发火芯片产生的等离子体温度越高^[6],所以等离子体与药剂的作用时间越短,发火延滞期就越短。

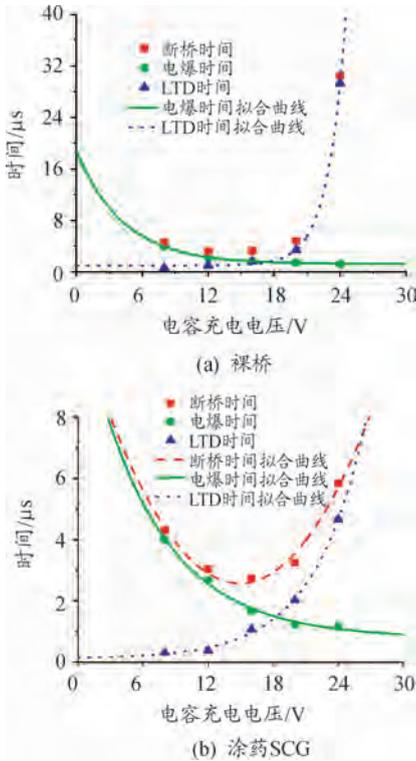


图 11 $t_{b\text{断桥}}$ 、 $t_{b\text{电爆}}$ 、 $t_{b\text{LTD}}$ 、 $t_{c\text{断桥}}$ 、 $t_{c\text{电爆}}$ 、 $t_{c\text{LTD}}$ 与电压的关系曲线

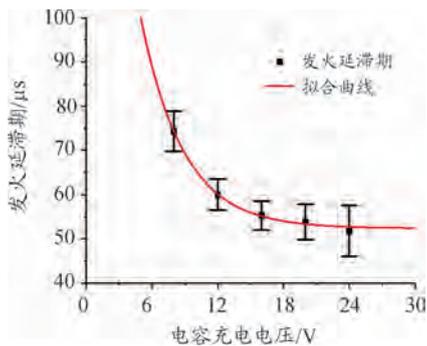


图 12 涂药 SCB 发火延滞期与电容充电电压的关系曲线

2.2.5 能量利用率特性分析

SCB 发火芯片的能量利用率是发火能量与电容所储存的总能量的比率,损耗率是消耗在除了发火件之外的放电回路上的能量与电容在放电之前所具有的总能量的比值,将每个电压下的涂药 SCB 能量利用率 $\omega_{c\text{利用}}$ 的数据统计在图 13 中,拟合曲线方程为:

$$\omega_{c\text{利用}} = 14.76 - 1.49 + 0.045U^2 \quad (11)$$

R-Square 系数为 0.944 99。

可以从图 13 中看出,裸桥能量利用率在各个电容充电电压下均高于涂药 SCB 发火能量利用率,尤其是在电压为 24 V 时,裸桥的平均能量利用率达到 20.31%,远远高于涂药 SCB,这说明对于磷掺杂的单晶硅 SCB 发火芯片来说,选择合适的电容充电电压可以得到较高的能量利用率。裸桥和涂药 SCB 的电容能量损耗率都比较低,在 0~2%。

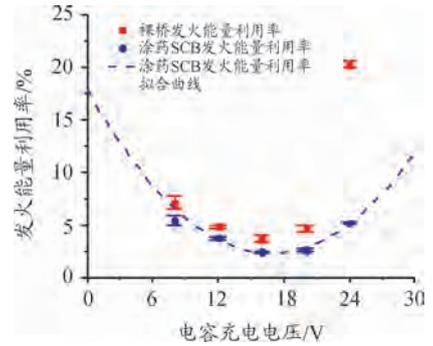


图 13 裸桥和涂药 SCB 发火能量利用率与充电电压的关系曲线

根据式(8)、(10)、(11)可得,在 22 μF 钽电容放电条件下,该尺寸规格的磷掺杂单晶硅 SCB 的 99.9% 发火电压为 5.9 V。在 5.9 V 到 16 V 的电压区间,发火能量上升,发火延滞期下降,能量利用率下降。选择 5.9 V 作为发火电压,根据式(8)、(10)、(11)计算得到涂药 SCB 发火能量为 70 μJ ,发火延滞期为 86.84 μs ,发火能量利用率为 7.54%。

3 结论

1) 在 8 V 到 24 V 的电容充电电压区间内,裸桥和涂药 SCB 电容充电电压对磷掺杂单晶硅 SCB 发火芯片裸桥和涂药 SCB 的电爆能量的影响很小。裸桥和涂药 SCB 所有电爆发火样品的电爆能量平均值分别为 34.29 μJ 和 34.27 μJ 。在 SCB 电爆产生等离子体之前,从 SCB 向药剂中传递的热量很少,药剂不会影响 SCB 的电爆能量。

2) 在 8 V 到 24 V 的电容充电电压区间内,电压越高,后期放电能量及时间都有所上升,SCB 等离子体起爆越可靠。电压大于 16 V 时,裸桥后期放电能量及时间上升幅度大于涂药 SCB,同时裸桥的掺杂单晶硅层发火化的面积会超过裸桥,电压越高面积相差越大。

3) 此规格磷掺杂单晶硅 SCB 在电容放电条件下电爆发火能量利用率较低,在 8 V 到 24 V 的电压区间内,能量利用率低于 5.5%,涂药 SCB 电爆发火能量利用率与电压的关系满足二次函数关系,当 $U = 16 \text{ V}$ 时,能量利用率最低为 2.46%,能够为 SCB 起爆电压的选择提供参考。

参考文献:

- [1] 祝逢春,秦志春,陈西武,等. 半导体桥的设计分析[J]. 爆破器材,2004,33(2):22-25.
- [2] BOUCHER C,NOVOTNEY D. Next generation semiconductor bridge initiators [C]//Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2013.
- [3] BENSON D A,LARSEN M E,RENLUND A M,et al. Semi-

- conductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosives[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(5): 1622 - 1632.
- [4] LEE K N, PARK M I, CHOI S H, et al. Characteristics of plasma generated by polysilicon semiconductor bridge (SCB)[J]. *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2002, 96(2/3): 252 - 257.
- [5] KIM J, NAVN K S, JUNGLING K C. Plasma electron density generated by a semiconductor bridge as a function of input energy and land material[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 44(6): 1022 - 1026.
- [6] 王文. 半导体桥等离子点火特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘忠山, 刘国应, 莫元玲. 半导体桥芯片性能影响因素的研究[J]. *火工品*, 2015(4): 13 - 16.
- [10] 鲍丙亮. 微尺寸起爆系统关键技术及应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [11] MARK K D, BICHES R W, WACKERBARTH D E. Characterization and Electrical Modeling of Semiconductor Bridges [J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1997.
- [12] 周蓉, 岳素格, 秦卉芊等. 半导体桥的研究[J]. *半导体学报*, 1998(11): 857 - 860.
- [13] GALVIN G J, THOMPSON M O, MAYER J W, et al. Time-resolved conductance and reflectance measurements of silicon during pulsed-laser annealing[J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1983, 27(2): 1079 - 1087.
- [14] BENSON D A, LARSEN M E, RENLUND A M, et al. Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosives[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(5): 1622 - 1632.
- [15] 马鹏, 张琳, 朱顺官, 等. 半导体桥裸桥与装 LTNR 时的点火特性[J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(3): 317 - 321.
- [16] KIM J, SCHAMILOGLU E, TOVAR B M, et al. Temporal Measurement of Plasma Density Above a semiconductor Bridge(SCB)[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1994, 44(4): 843 - 846.
- [17] KIM J, JUNGLING K C. Measurement of Plasma Density Generated by A Semiconductor Bridge: Related Input Energy and Electrode[J]. *ETRI Journal*, 1995, 17(2): 11 - 19.

科学编辑 李瑞(南京理工大学博士研究生)

责任编辑 唐定国