

文章编号: 1006-9941(2008)05-0564-03

## 半导体桥电爆过程的能量转换测量与计算

张文超, 叶家海, 秦志春, 周 彬, 田桂蓉, 徐振相

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 对电容激励模式下半导体桥(SCB)的电流、电压以及光的变化进行了测试,从能量的角度对半导体桥电爆换能过程进行了分析,并对电爆换能过程中硅桥物质形态的变化进行了量化分析,在电容为 22  $\mu\text{F}$ 、充电电压为 45 V 的情况下,SCB 上电压为最低时(2.18  $\mu\text{s}$ , 10 V)有 61.1% 的桥区熔化,SCB 上电压为最高时(3.48  $\mu\text{s}$ , 43 V)桥区有 14.5% 气化,在 SCB 发火光强最亮时(17.60  $\mu\text{s}$ )有 70.3% 的半导体硅桥电离。

**关键词:** 应用化学; 火工品; 半导体桥; 等离子体; 电爆换能

**中图分类号:** TJ45; TN303

**文献标识码:** A

### 1 引 言

半导体桥(semiconductor bridge, SCB)火工品是指利用微电子制造技术使一种或多种金属(或非金属)有控制地沉积于硅片上形成的单层或多层半导体膜(或金属-半导体复合膜)作为点火起爆单元的火工品。它具有低发火能量、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<sup>[1]</sup>,是桥丝式火工品的理想换代品。研究 SCB 电爆换能过程对研究其点火、起爆能力和进行 SCB 的设计、制造以及应用都具有重要意义。

国内外研究人员通过对 SCB 爆发过程的研究,通常认为 SCB 在电激励作用下爆发生成了等离子体,灼热的等离子体作用于火工药剂,使火工药剂发火<sup>[2-5]</sup>,但是对 SCB 电爆换能过程中桥的状态变化,国内外未见系统的量化研究。本实验对作用于 SCB 上的电流、电压以及光进行了测试,从能量的角度对 SCB 电爆换能过程进行量化分析。

### 2 实 验

#### 2.1 SCB 的结构与材料特性

本实验所用的 SCB 的结构如图 1 所示,SCB 是在氧化硅上外延生成多晶硅,然后在多晶硅上掺杂浓度约为  $10^{20}/\text{cm}^3$  的磷,经刻蚀形成“H”形的桥图形,然后采用金属溅射生成铝金属焊接区,最终得到电阻为 1  $\Omega$ 、桥区尺寸为 90  $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  的 SCB。将制得的

SCB 用环氧树脂固定在陶瓷基座上,然后采用硅铝丝将 SCB 与电极相连,封装后的 SCB 点火装置如图 2 所示。

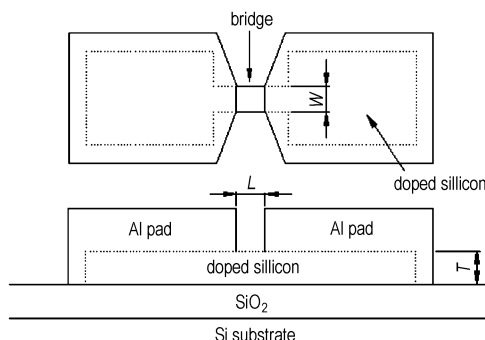


图 1 典型 SCB 结构图

Fig. 1 Schematic view of a typical SCB

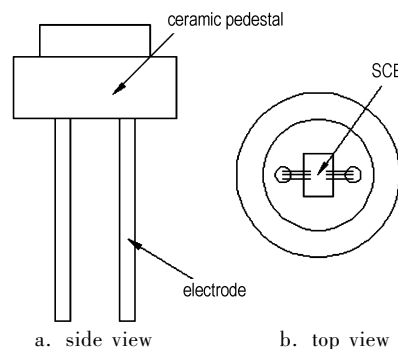


图 2 SCB 点火装置结构图 (a) 侧视图 (b) 俯视图

Fig. 2 An example of SCB device (a) side view (b) top view

#### 2.2 SCB 电爆过程的电压、电流和发光强度的测试方法

SCB 点火电路及 SCB 电压、电流和光测试系统如图 3 所示。SCB 点火电路由电源、电容、SCB 以及无感导线组成,其中无感导线的电阻( $R_2$ )为 0.01  $\Omega$ 。实验所用 SCB 为裸桥,电容  $C$  为 22  $\mu\text{F}$ ,充电电压为 45 V,闭合开关  $K_1$ ,电源对电容  $C$  充电,然后断开开关  $K_1$ ,

收稿日期: 2008-01-25; 修回日期: 2008-07-21

基金项目: 重点实验室基金(9140C3701040701)

作者简介: 张文超(1977-),男,助理研究员,在职博士研究生,现主要从事先进火工品、等离子体点火等方面研究。

e-mail: zhangwenchao303@yahoo.com.cn

闭合 K2, SCB 在电能的激励下爆发。

高速数字存储示波器 (OSC-LeCroy WaverPro960 型, 带宽 2 GHz、采样速度 100 Ms/s) 通过电压、电流探头与点火电路相连, 记录 SCB 爆发过程中的电压、电流的变化, 光纤将 SCB 爆发形成的光信号传输到单色器, 由光电倍增管 (R300 型) 将光信号转换成电信号, 高速数字存储示波器采集并存储光电倍增管的电信号。

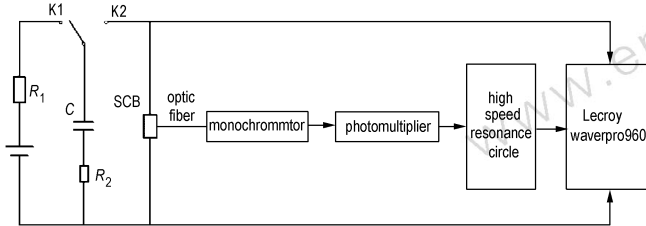


图 3 SCB 电流、电压和光强测试系统

Fig. 3 Voltage, current and luminous intensity measurement system of SCB

### 3 结果与讨论

#### 3.1 SCB 上的电压、电流、发光强度随放电时间变化特征的测试与分析

应用图 3 所示测试系统对 SCB 的电爆过程进行了测试, 测得的 SCB 电压、电流以及光谱强度的变化曲线如图 4 所示。

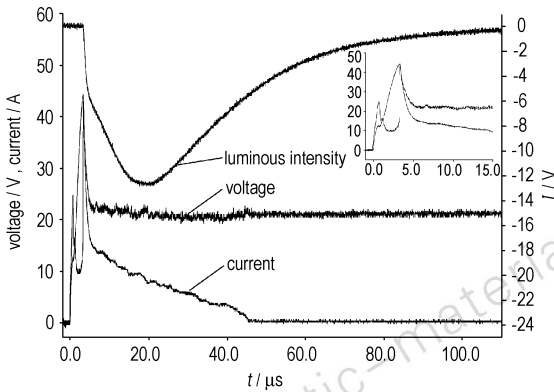


图 4 SCB 电压、电流及光谱强度随放电时间变化曲线

Fig. 4 The evolution of SCB's voltage, current and luminous intensity vs. time

由图 4 及其对应的数据可知：开关 K2 闭合时, 电压曲线立即快速上升, 在  $0.82 \mu\text{s}$  时电压达到第一个峰值  $25 \text{ V}$ , 之后又快速下降, 在  $2.18 \mu\text{s}$  时电压降到最低点  $10 \text{ V}$  (规定电压为最低点时所对应的时间为  $t_1$ )。此后电压再次升高, 在  $3.48 \mu\text{s}$  时电压达到第二个峰值  $43 \text{ V}$ , 此时 SCB 爆发产生光信号 (规定电压为最高

点时所对应的时间为  $t_2$ )。电压在达到第二个峰后又迅速下降, 在  $5.58 \mu\text{s}$  后电压即保持在  $21 \text{ V}$  左右。

电流曲线在开关 K2 闭合后单调快速上升,  $3.48 \mu\text{s}$  时和电压同时达到最大值, 此时瞬时电流为  $44 \text{ A}$ , 此后电流也迅速下降, 在  $5.58 \mu\text{s}$  时降至  $15 \text{ A}$ , 但此后电流下降速率变慢, 直至  $45.5 \mu\text{s}$  时电流才基本降为  $0 \text{ A}$ 。

SCB 爆发产生的光信号在初始阶段光强以较快的速度增加, 在  $17.60 \mu\text{s}$  达到最大值 (规定光强为最大时所对应的时间为  $t_3$ )。此后光强以较慢的速度减小, 在电流为 0 时光强仍接近最大值的一半, 直至  $110 \mu\text{s}$  时光强趋近于 0, 整个发光过程持续时间大于  $100 \mu\text{s}$ 。

#### 3.2 SCB 电爆换能过程分析

将测得的电压和电流-时间相乘可得功率 ( $P$ )-时间曲线, 再积分可得输入 SCB 上的电能 ( $E$ ) 随时间 ( $t$ ) 的关系曲线, 如图 5 所示。

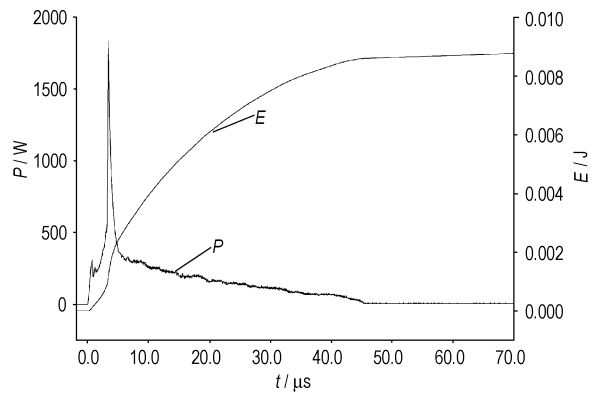


图 5 SCB 上的功率和电能随时间变化曲线

Fig. 5 The evolution of SCB consumed power and energy vs time

根据图 5 曲线可得不同特征时间输入 SCB 的电能, 平行测五发可得不同时间输入 SCB 电能的平均值, 由文献 [6] 可知, SCB 的电能有 64% 转变为桥的热焓, 因此可得不同特征时间点的 SCB 焓变, 所得数据见表 1。

表 1 不同特征时间 SCB 的焓变

Table 1 Enthalpy change of silicon bridge with different time

time	consumed energy of SCB / mJ					average of SCB's consumed energy / mJ	enthalpy change of SCB / mJ
$t_1$	0.40	0.44	0.42	0.39	0.38	0.40	0.26
$t_2$	0.96	1.04	1.04	1.12	1.13	1.06	0.68
$t_3$	5.69	5.63	5.84	5.77	6.11	5.81	3.72

下面从理论上计算 SCB 不同相变阶段的焓变<sup>[7]</sup>。

SCB 固相升温到熔点的焓变为:

$$Q_1 = C_p \times m \times (t_{\text{melt}} - t_0) \quad (1)$$

熔化过程的焓变为:

$$Q_2 = \Delta H_{\text{melt}} \times n \quad (2)$$

SCB 熔化到沸点的焓变为:

$$Q_3 = C_p \times m \times (t_{\text{vap}} - t_{\text{melt}}) \quad (3)$$

气化过程的焓变为:

$$Q_4 = \Delta H_{\text{vap}} \times n \quad (4)$$

电离能的焓变为:

$$Q_5 = (q_x + E_g) \times \text{原子数目} \quad (5)$$

式中,  $m$  为 SCB 桥区质量,  $n$  为桥区摩尔数。已知硅材料  $C_p = 700 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $\Delta H_{\text{melt}} = 50.55 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{vap}} = 384.22 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 硅原子密度为  $5.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , 硅质量密度为  $2.328 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 电子亲和能  $q_x = 4.05 \text{ eV}$ , 禁带宽度  $E_g = 1.12 \text{ eV}$ ,  $t_{\text{melt}} = 1687 \text{ K}$ ,  $t_{\text{vap}} = 2628 \text{ K}$ ,  $t_0 = 298 \text{ K}$ <sup>[8]</sup>, SCB 的尺寸为  $90 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。

代入(1)~(5)计算可得 SCB 在不同相变阶段理论消耗的能量:

$$Q_1 = 0.122 \text{ mJ}; Q_2 = 0.226 \text{ mJ}; Q_3 = 0.083 \text{ mJ}; \\ Q_4 = 1.719 \text{ mJ}; Q_5 = 2.233 \text{ mJ}$$

由实验数据及理论计算知, 在电压降到最低点时 SCB 的熔化率为:

$$\text{硅桥熔化率} = \frac{Q_{\text{实验}} - Q_1}{Q_2} \times 100\% = 61.1\%$$

同理可得 SCB 在不同时刻的气化率和电离率, 具体数据见表 2。

表 2 不同时间 SCB 熔化、气化、电离率  
Table 2 Melting-ratio, vaporizing-ratio and ionizing-ratio of SCB at different time

time	$t_1$	$t_2$	$t_3$
enthalpy change of SCB /mJ	0.26	0.68	3.72
ratio of SCB's enthalpy change /%	melting ratio 61.1	vaporizing ratio 14.5	ionizing ratio 70.3

由表 2 可知在 SCB 上电压为最低点( $t_1$ )时有 61.1% 的 SCB 熔化, 由文献[6]知, SCB 的一个重要特征是熔化时电阻率明显下降, 熔化的电阻率为固态电阻率的 1/10, 因此在  $0 \sim t_1$  阶段 SCB 的熔化造成了桥两端电压的下降。在 SCB 上电压为最高点( $t_2$ )时 SCB 有 14.5% 气化, 而气化桥的电导为零, 因此在  $t_1 \sim t_2$  阶段随着 SCB 熔化结束气化的产生, SCB 电阻增加, 电压升

高。在光强为最强( $t_3$ )时有 70.3% 的半导体硅桥被电离, 因此在  $t_2 \sim t_3$  阶段随着 SCB 进一步气化, 在电能的作用下气化桥被电离, 电阻增大趋势变缓电压降低。

## 4 结论

采用高速数字存储示波器对电容激励模式下半导体桥电爆过程的能量转换进行了测量, 根据半导体硅桥热焓的理论计算, 得到了半导体桥在电容为  $22 \mu\text{F}$ 、充电电压为  $45 \text{ V}$  的情况下, 当半导体桥上电压为最低时 ( $2.18 \mu\text{s}$ ,  $10 \text{ V}$ ) 半导体桥区有 61.1% 熔化, 半导体桥上电压为最高时 ( $3.48 \mu\text{s}$ ,  $43 \text{ V}$ ) 有 14.5% 的桥区气化, 在半导体桥产生的光强最强时 ( $17.60 \mu\text{s}$ ) 有 70.3% 的半导体硅桥电离。

## 参考文献:

- [1] 祝逢春, 徐振相, 陈西武, 等. 半导体桥火工品研究新进展[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 106-110.  
ZHU Feng-chun, XU Zhen-xiang, CHEN Xi-wu, et al. Progress the semiconductor bridge initiator[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 106-110.
- [2] Jongdae Kim, Tae Moon Roh, Kyoung-Ik Cho, et al. Optical characteristics of silicon semiconductor bridges under high current density conditions[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(5): 852-857.
- [3] Jong-Uk Kim, Chong-Ook Park, Myung-Il Park, et al. Characteristics of semiconductor bridge (SCB) plasma generated in a micro-electromechanical system (MEMS) [J]. *Physics letters A*, 2002, 305: 413-418.
- [4] 王治平, 费三国, 龚晏青, 等. 半导体桥起爆炸药的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 359-363.  
WANG Zhi-ping, FEI San-guo, GONG Yan-qing, et al. The experimental research on the initiation of explosives by semiconductor bridge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(4): 359-363.
- [5] 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.  
ZHU Fen-chun, QIN Zhi-chun, CHEN Xi-wu, et al. Analyses on semiconductor bridge design[J]. *Explosive Materials*, 2004, 33(2): 22-25.
- [6] Benoson D A, Lorsen M E, Renlund A M, et al. Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignitor of explosive[J]. *Appl Phys*, 1987, 62(5): 1622-1632.
- [7] 王国娟. 半导体桥火工品电爆特性试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
WANG Guo-juan. Experimental study on the electro-explosive characteristics of semiconductor bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [8] 邓志杰, 郑安生. 半导体材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
DENG Zhi-jie, ZHENG An-sheng. Semiconductor Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

(下转 576 页)

## 四氮烯异构体的密度泛函理论研究

崔燕<sup>1,2</sup>, 张同来<sup>1</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 杨利<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术重点实验室, 北京 100081;

2. 防化研究院第六研究所, 北京 102205)

**摘要:** 采用密度泛函理论对四氮烯起爆药的异构体进行研究。在 B3LYP/6-311 + G\*\* 水平下对四氮烯三种异构体分子的几何结构进行全优化计算。计算结果表明, (III) 的总能量比 (I) 和 (II) 都低, 这说明 (III) 是最稳定的分子结构, 这与四氮烯的晶体结构和 (III) 非常相近这一事实一致。对三种异构体分子的红外振动计算结果表明, 它们的分子中都不存在虚频, 由此说明这三种异构体都是可能存在的结构。由三种异构体分子的 NBO 电荷可以看出, (III) 分子中的原子排列比 (I) 和 (II) 便于分子中电荷的分散。前线轨道分析结果表明: N(8) 是 (III) 分子中最活跃的原子, 在 (III) 被活化的时候, N(8)—N(12) 键先断裂。

**关键词:** 物理化学; 四氮烯; 异构体; 分子结构; 密度泛函理论

**中图分类号:** TJ55; O626.28; O641.12

**文献标识码:** A

(上接 566 页)

## Measurement and Calculation for SCB Electro-explosion Energy Conversion Features

ZHANG Wen-chao, YE Jia-hai, QIN Zhi-chun, ZHOU Bin, TIAN Gui-rong, XU Zhen-xiang

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The changes of current, voltage and light intensity of semiconductor bridge (SCB) with discharge time under capacitor energy supply excitation were conducted. The electro-explosion energy conversion processes and phase changes for SCB were analyzed based from the electric energy input and enthalpy change theoretical calculation. Results show that melting ratio, vaporizing ratio and ionizing-ratio of SCB are 61.1%, 14.5% and 70.3% at 2.18  $\mu\text{s}$ , 3.48  $\mu\text{s}$ , and 17.60  $\mu\text{s}$  respectively when the capacitance is 22  $\mu\text{F}$  and the charging voltage is 45 V.

**Key words:** applied chemistry; pyrotechnics; semiconductor bridge; plasma; electro-explosive energy conversion

(上接 571 页)

## Theoretical Study on Relationship Between Structures and Properties of Pyrazole Compounds

YIN Ming<sup>1</sup>, SHU Yuan-jie<sup>1</sup>, XIONG Ying<sup>1</sup>, LUO Shi-kai<sup>1</sup>, LONG Xin-ping<sup>2</sup>, ZHU Zu-liang<sup>2</sup>, DU Jun-liang<sup>3</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. School of Materials Science and Engineering, SUST, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Structures of pyrazole compounds were constructed and their energetic properties were studied theoretically. For 9 pyrazole compounds, their geometry and electronic structures were analyzed by means of natural bond orbital (NBO) theory; their reactivity was analyzed by electrostatic potential distributions, heats of formation and Bader density were also calculated. After that, detonation velocities and Chapman-Jouguet pressures of these compounds were given by means of VLW equation. Results show that there is some aromaticity in the ring of pyrazole compounds, also there is some linear relationship between total energy, density and the number of amine groups respectively. Calculated detonation velocities of these compounds are more than 8.0  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ , which indicate that these compounds are very good potential energetic materials.

**Key words:** physical chemistry; energetic materials; theoretical study; derivative of pyrazolo[4,3-c] pyrazole; structure and property; detonation performance