

文章编号: 1006-9941(2009)03-0344-05

半导体桥生成等离子体温度的测量

张文超, 王 文, 周 彬, 秦志春, 张 琳, 叶家海, 田桂蓉

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要:应用原子发射光谱双谱线测温法原理,采用高速数字存储示波器对半导体桥生成的等离子体温度以及桥上电压、电流变化进行了实时瞬态测量,获得了等离子体温度以及半导体桥上消耗的能量随时间变化的曲线,在半导体桥两端施加 21 V 电压的条件下,对 6.8、15、47、68、100 μF 五种不同容量的钽电容对半导体桥的作用时间、消耗能量以及生成等离子体温度的影响进行了研究,结果表明:半导体桥生成等离子体最高温度与电容呈线性关系,其最高温度由 6.8 μF 时的 2242 K 升高到 100 μF 时的 3324 K。

关键词:应用化学;火工品;半导体桥;等离子体;温度测量

中图分类号: TJ45⁺3; O536; O657.31

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.022

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^[1],是桥丝式火工品的理想换代品。它的作用过程是:电能作用于 SCB 使其加热熔化、气化形成等离子体,灼热的硅等离子体通过微对流作用迅速扩散到火药剂中,向药剂进行极迅速的热量传递和冲击,使装药达到着火条件而发火^[2-3]。

SCB 生成的等离子体具有温度高(3000 K 以上)、尺度小(< 1 mm)、持续时间短(< 0.2 ms)等特点^[4-5],温度和密度是等离子体两个基本特征参量,等离子体的其它参量大多与其有关,另外半导体桥等离子体温度的实时测量是研究 SCB 电爆过程以及等离子体与药剂相互作用机理的重要基础,因此对 SCB 生成的等离子体温度测量具有重要意义。Jongdae Kim 等^[5]利用发射光谱采用普朗克公式对同一电容下不同电极的 SCB 生成等离子体温度进行了测试。Jong-Uk Kim 等^[6]也研究了 SCB 生成的等离子体随时间的变化,利用冲击波公式,理论计算得到了 SCB 生

成的等离子体温度。冯红艳^[7]、张文超^[8]等采用原子发射光谱双谱线法在不同电压下对半导体桥生成等离子体温度的影响进行了研究,但是同一电压下不同电容对 SCB 生成等离子体温度的影响国内外未见报道。本实验采用原子发射光谱双谱线法对 SCB 生成的等离子体温度进行实时测量,研究同一电压条件下不同电容对 SCB 等离子体温度的影响。

2 原子发射光谱双谱线法测量半导体桥等离子体温度的基本原理

根据原子光谱学理论^[9],同种原子的两条谱线的强度比为:

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} e^{-\frac{E_1 - E_2}{kT}} \quad (1)$$

式中, I_{λ_1} 和 I_{λ_2} 为两条波长分别是 λ_1 和 λ_2 的相对光谱强度; A_1 和 A_2 分别为两条谱线的跃迁几率; g_1 和 g_2 分别为两条谱线激发态的统计权重; E_1 和 E_2 分别为两条谱线的激发电位; k 为 Boltzmann 常数; T 为激发温度。

对(1)式两边取对数得:

$$\ln\left(\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}}\right) = \ln\left(\frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1}\right) - \frac{E_1 - E_2}{kT} \quad (2)$$

$$\text{令 } R = \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}}, A = \ln\left(\frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1}\right)$$

则

$$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{E_2 - E_1}{\ln R - A} \quad (3)$$

收稿日期:2008-07-28;修回日期:2009-01-04

基金项目:国家自然科学基金(50806033);重点实验室基金资助项目

作者简介:张文超(1977-),助理研究员,博士,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

对于已知的两条谱线而言, $A_1, A_2, g_1, g_2, \lambda_1, \lambda_2, E_1, E_2$ 和 k 均为常数, 所以, 只要测得两条谱线的相对光谱强度 I_{λ_1} 和 I_{λ_2} , 即可由式 (3) 求得温度 $T, A_1, A_2, g_1, g_2, \lambda_1, \lambda_2, E_1, E_2$ 的值分别为 $7.5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}, 2.0 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}, 6.4, 521.8 \text{ nm}, 510.5 \text{ nm}, 6.19 \text{ eV}, 3.82 \text{ eV}$ 。

3 实验

3.1 SCB 芯片的结构

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, 然后采用金属溅射生成铝金属焊接区, 最终得到电阻为 1Ω 、桥区尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ ($L \times W \times T$) 的 SCB。将制得的 SCB 用环氧树脂固定在陶瓷基座上, 然后采用硅铝丝将电极与 SCB 芯片两端的焊盘相连, 封装后的 SCB 点火装置如图 2 所示。

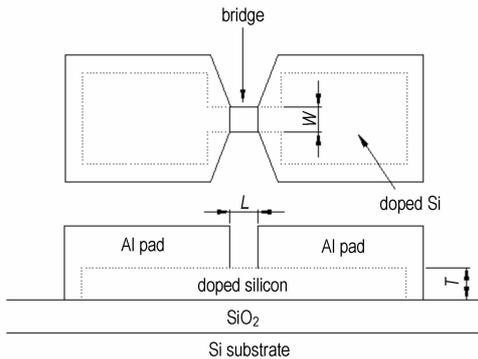


图 1 典型 SCB 结构图

Fig. 1 Schematic view of a typical SCB

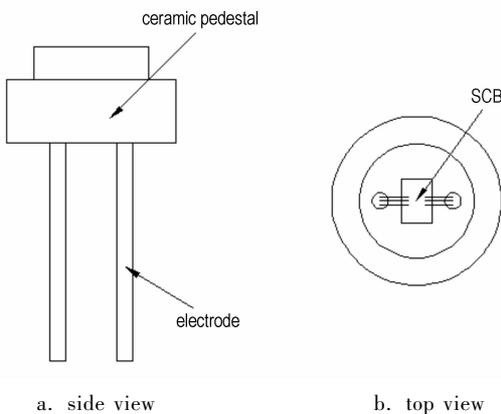


图 2 半导体桥点火装置结构图

Fig. 2 Schematic views of SCB device

3.2 SCB 等离子体温度测试系统及测试方法

SCB 点火电路及电流、等离子体温度测试系统如

图 3 所示。SCB 点火电路由电源、电容、SCB 以及无感导线组成。实验所用 SCB 为裸桥, 试验时, 开关 K 左闭合, 电源对电容 C 充电, 充电到一定值时开关 K 右闭合, SCB 在电能的激励下爆发形成等离子体。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, 等离子体温度测试系统中的光纤将 SCB 形成等离子体的光信号传输到单色器, 形成 $\text{CuI } 521.8 \text{ nm} (\lambda_1)$ 和 $\text{CuI } 510.5 \text{ nm} (\lambda_2)$ 两条谱线, 由两个光电倍增管将光谱信号转换成电信号, 高速数字存储示波器 (OSC-LeCroy WaverPro960 型, 带宽 2 GHz 、采样速度 100 Ms/s) 采集并存储两个通道的电信息, 经公式 (3) 计算即得到等离子体温度的实时变化曲线。

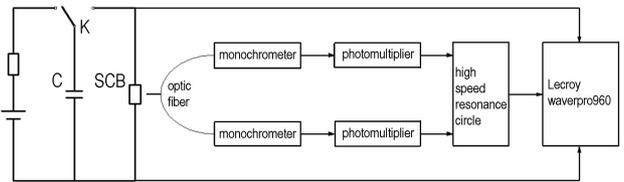


图 3 SCB 电压、电流及生成等离子体温度测试系统

Fig. 3 System of measuring SCB voltage, current and plasma temperature

4 结果与讨论

4.1 SCB 电压、电流以及光谱相对强度随时间的变化

实验所用电容为钽电容, 容量分别为 $6.8, 15, 47, 68, 100 \mu\text{F}$ 五种, 在充电电压为 21 V 的条件下对 SCB 的电压、电流以及生成等离子体温度进行测试, 每种条件下平行测三发, 得到了一系列 SCB 上电压、电流以及光谱相对强度 (I) 随时间 (t) 的变化曲线, 图 4 为 $68 \mu\text{F}$ 时的一组典型实验曲线。

由图 4 可知: 在开关右闭合后, 电压曲线立即快速上升, 在 $1.06 \mu\text{s}$ 时电压达到第一个峰, 之后又快速下降, 在 $3.95 \mu\text{s}$ 时电压降低到最低点, 此后电压再次升高, 在 $5.10 \mu\text{s}$ 时电压达到第二个峰值, 此时 SCB 爆发生成了等离子体 (规定电压为最高点 SCB 爆发时所对应的时间为 t_1)。电流曲线在开关右闭合后单调快速上升, 在 $5.10 \mu\text{s}$ 时达到最大值, 此时 SCB 爆发, 瞬时电流达到 30.3 A , 此后电流下降, 在 $19.5 \mu\text{s}$ 时电流降为 0 A , 该时刻即为电容作用于 SCB 的终止时间 (规定电流降为 0 A 时的时间为 t_2)。 t_2 和 t_1 的差值即为电能作用于等离子体上的时间。

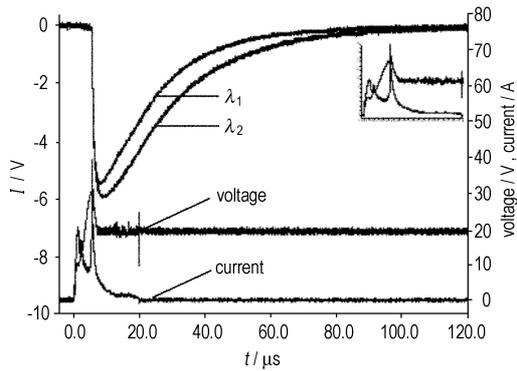


图 4 SCB 电压、电流以及光谱相对强度随时间变化曲线
Fig. 4 Curves of SCB voltage, current and emission intensity vs time

SCB 爆发产生的光信号在初始阶段光强快速增加,其中 λ_1 光谱曲线在 $7.17 \mu\text{s}$ 时光强最强, λ_2 光谱曲线在 $8.71 \mu\text{s}$ 时光强达到最大值,此后两条曲线的光谱强度以较慢的速度减小,在 $120 \mu\text{s}$ 时两条谱线的强度趋近于零。

4.2 SCB 生成等离子体温度以及消耗的能量随时间的变化

将测得的 $I \sim t$ 曲线用式 (3) 处理,可得 SCB 在 $68 \mu\text{F}$ 电容和 21 V 电压条件下生成的等离子体温度 (T) 随时间 (t) 变化的曲线,如图 5 所示。将测得的电压和电流-时间曲线相乘可得功率 (P)-时间 (t) 曲线,然后再积分可得 SCB 消耗的电能 (E) 随时间 (t) 的关系曲线,如图 5 所示。

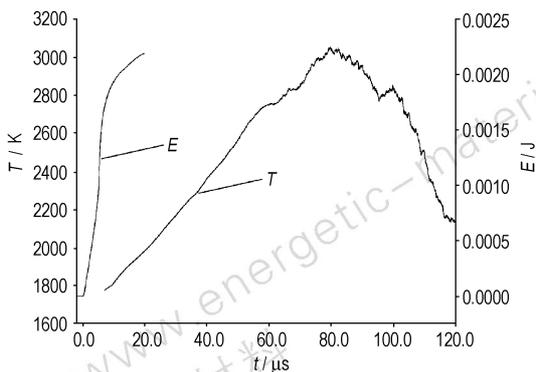


图 5 SCB 等离子体温度及 SCB 消耗的电能随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of SCB plasma temperature and SCB consumed energy vs time

由图 4 中电压、电流曲线可得电容作用于 SCB 不同特征点的时间,取同一实验条件下电容作用于 SCB 不同特征点的时间,然后求平均值,结果如表 1 所示。

根据图 5 中 $E-t$ 曲线可得不同特征时间点的 SCB 消耗的电能,结果见表 1。

由表 1 中数据经计算可知:电能作用于等离子体上的时间 ($t_2 - t_1$) 在小电容阶段增加不明显,随着电容进一步增大作用时间迅速增加,电能作用于等离子体上的时间随电容的变化总体呈抛物线形式增长,在此时间内 SCB 消耗的能量随着电容的变化情况也如上所述,但是两条曲线的增幅不同。

表 1 充电电压为 21 V 条件下不同电容的作用时间及 SCB 消耗的能量

Table 1 Functioning time and SCB consumed energy with respect to different capacitances under 21 V

capacitor / μF	average of $t_1 / \mu\text{s}$	average of SCB consumed energy at t_1 / mJ	average of $t_2 / \mu\text{s}$	average of SCB consumed energy at t_2 / mJ
6.8	10.5	0.758	10.9	0.772
15	6.30	0.906	7.53	1.05
47	4.78	0.846	7.96	1.24
68	5.36	1.05	18.3	2.20
100	4.08	0.840	60.0	4.30

4.3 SCB 生成等离子体温度随充电电容的变化

由图 5 中的 $T-t$ 变化曲线可得 SCB 在 $68 \mu\text{F}$ 电容和 21 V 电压条件下生成等离子体的最高温度,每一实验条件下平行测三发,可得五种电容激励 SCB 生成等离子体的最高温度,求平均后得到的实验结果见表 2。

表 2 充电电压为 21 V 条件下不同电容激励 SCB 等离子体温度

Table 2 SCB plasma maximum temperature with respect to different capacitances under 21 V

capacitor / μF	$\bar{T}_{\text{max}} / \text{K}$	standard deviation / K	relative standard deviation / %
6.8	2242	219.8	9.8
15	2279	127.4	5.6
47	2737	80.4	2.9
68	2820	256.3	9.1
100	3324	74.9	2.2

由表 2 中数据可知:随着电容容量的增加,SCB 等离子体的最高温度也随之升高。等离子体最高温度与充电电容之间的关系拟合曲线方程为: $T_{\text{max}} = 2137.5 + 11.5C$,相关系数为 0.99。

由文献 [10] 中公式计算可得,本实验所用的尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ ($L \times W \times T$) 的 SCB 从常温

到完全气化理论上所需的能量为 2.39 mJ; 由文献[4]知, SCB 消耗的电能有 64% 转变为桥的热焓, 因此在考虑能量损失的情况下, SCB 完全气化需要的电能为 3.73 mJ。由表 1 中的数据可知, 6.8 μF 、15 μF 、47 μF 、68 μF 四种电容 SCB 消耗的能量小于 SCB 完全气化所需的能量, 在这种情况下, 本实验测得了 SCB 生成的等离子体温度。造成这种情况的原因是因为在电容激励的情况下, 作用于 SCB 上的时间很短, SCB 桥区的硅来不及全部从固态气化生成等离子体, 实验测得的 SCB 生成的等离子体温度是部分或部分桥区气化电离后的温度。在 100 μF 大电容情况下, 由于 SCB 消耗的能量较大且作用时间较长, SCB 桥区大部分或全部从固态经液态到气化直至电离生成等离子体, 因此实验测得的 SCB 生成的等离子体温度是大部分或全部桥区气化后电离的温度。由上述的理论计算及分析可知: 在电容激励情况下, SCB 桥区并不是全部气化后再电离生成等离子体, 而是桥区部分气化到一定浓度后在一定电压作用下击穿气体电离生成等离子体, 因此 SCB 生成等离子体是随着桥区不断气化而持续电离的过程。

在 6.8 μF 电容情况下, 虽然作用于 SCB 上的时间较 15 μF 、47 μF 长, 但由于电容贮存的能量小, 只有少量硅桥气化, 生成的硅蒸汽经电离、膨胀以及热散失后, 温度降低, 在此过程中硅蒸汽虽然电离生成了等离子体, 但电流只有 0.4 μs 对等离子体加热, 因此所测得的 SCB 生成等离子体温度较低。在小电容情况下, 随着电容容量的增加, 电流加热等离子体的时间和能量近似线性增加, 因此 SCB 生成等离子体的温度线性升高。随着电容容量的进一步增加, 电流加热等离子体的时间和能量迅速增加, 但是单位时间作用于等离子体的能量与小电容情况相比有所降低, 因此 SCB 生成等离子体的温度仍然随电容增大而线性升高。

5 结 论

(1) SCB 生成等离子体的方式是随着桥区不断气化而持续电离的过程。

(2) 随着电容容量的增加, SCB 生成等离子体的最高温度也随之升高。等离子体最高温度与充电电容量呈线性关系, 这种关系主要是 SCB 生成等离子体的方式、电容作用于等离子体的时间以及能量等三种因素共同作用的结果。

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] 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 Shockwaves*, 2000, 20(4): 359 - 363.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 冯红艳, 李燕, 张琳, 等. 原子发射光谱双谱线法测量半导体桥(SCB)等离子体温度[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 134 - 136.
FENG Hong-yan, LI Yan, ZHANG Lin, et al. Measurement of the semiconductor bridge (SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 134 - 136.
- [8] 张文超, 周彬, 王文, 等. 半导体桥等离子体温度的原子发射光谱法测量[J]. 原子与分子物理学报, 2008, 25(2): 313 - 316.
ZHANG Wen-chao, ZHOU Bin, WANG Wen, et al. Measurement of semiconductor bridge plasma temperature using spectroscopic method[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2008, 25(2): 313 - 316.
- [9] Reif J, Fassel V A, Kniseley R U. Spectroscopic flame temperature measurements and their physical significance - I: Theoretical concepts - A critical review[J]. *Spectrochim Acta*, 1973, 28: 105 - 123.
- [10] 张文超, 叶家海, 秦志春, 等. 半导体桥电爆过程的能量转换测量与计算[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 564 - 566.
ZHANG Wen-chao, YE Jia-hai, QIN Zhi-chun, et al. Measurement and calculation for SCB electro-explosion energy conversion features[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 564 - 566.

Measurement of Semiconductor Bridge Plasma Temperature under Different Capacitances Using Spectroscopic Method

ZHANG Wen-chao, WANG Wen, ZHOU Bin, QIN Zhi-chun,

ZHANG Lin, YE Jia-hai, TIAN Gui-rong

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

Abstract: The real-time measurement of the SCB voltage, current and plasma temperature based on the double-line method of atomic emission spectroscopy was conducted by using high-speed digital oscilloscope. The curves of SCB plasma temperature and SCB consumed energy versus time were obtained. The effects of five different capacitances (6.8, 15, 47, 68, 100 μF) on the functioning time, SCB consumed energy and SCB plasma maximum temperature were analyzed respectively when the charging voltage was 21 V. The results show that there is a linear relationship between the maximum temperatures and the capacitances. SCB plasma maximum temperature increases from 2242 K to 3324 K when capacitance increases from 6.8 μF to 100 μF .

Key words: applied chemistry; pyrotechnics; semiconductor bridge; plasma; temperature measurement

(上接 333 页)

Quantitative Analysis of Molar Substitution of Cellulose Glycerol Ether as Intermediate of Energetic Binder

SHAO Zi-qiang, ZHANG You-de, WU Man-li, WANG Fei-jun

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore a gas chromatographic method to determinate molar substitution (MS) of cellulose glycerol ether (GEC) as intermediate of energetic binder, GEC was decomposed to isopropyl iodide by HI at 150 $^{\circ}\text{C}$ under acid condition, and the products were determined by GC-MS. The reaction mechanisms were inferred. By means of determination of isopropyl iodide in reaction products with GC, the content of dihydroxypropyloxy in GEC and MS of GEC were calculated. Results show that the MS of three GEC samples are 0.375, 0.425 and 0.531 respectively, and RSD are less than 0.2%, and recovery rate are more than 96%. Compared with the ways of chemical titration and element analysis (EA), the GC method can be used to determinate the MS of GEC and others of hydroxyalkyl cellulose ethers with a good reproducibility and high accuracy.

Key words: polymer chemistry; cellulose glycerol ether; molar of substitution; gas chromatography