

原子发射光谱法研究 SCB 放电特性

张琳¹, 冯红艳¹, 朱顺官¹, 吴蓉², 张文超¹

1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094
2. 巢湖大学化学系, 安徽 巢湖 238000

摘要 半导体桥(SCB)通过桥膜放电进行含能材料的点火,具有低点火能量、高安全性以及能与数字逻辑电路组合等优点。文章利用原子发射光谱技术研究了其放电特性。首先用 Cu 原子谱线 510.5 和 521.8 nm 进行温度测量,用 Si 原子谱线 390.5 nm 和 Si 离子线 413.0 nm 进行电子密度测量,同时获得 SCB 放电温度和电子密度随时间分布的测量结果。在放电电压为 20 V,充电电容为 47 μF 条件下,1.0 Ω 的 SCB 放电温度分布在 2 500~4 300 K 之间,电子密度约为 10^{16} cm^{-3} 左右。然后根据光谱诊断结果,结合等离子体成立的空间尺度和时间尺度条件,判断两种规格的 SCB 的放电行为是否产生等离子体。该研究结果为 SCB 桥体的设计以及点火方式的控制提供了理论依据,也为瞬态小尺寸等离子体的判断和诊断提供了一种参考方法。

关键词 原子发射光谱法; 温度诊断; 电子密度诊断; 等离子体判据; SCB 放电

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3130-04

引言

半导体桥(SCB)是利用微电子制作技术使金属或其他材料沉积于硅片上形成的单层或多层半导体复合膜作为电热换能的器件,具有点火迅速、抗辐射以及可实现逻辑控制等优势,是含能材料点火的一个发展方向^[1]。其点火过程为一定方式的电能施加到尺寸为微米级的桥体两端,桥体材料被汽化、电离,然后引爆含能材料。通常认为,SCB 在放电的瞬间形成等离子体,从而实现快速点火。而有研究表明,SCB 是否形成等离子体,与桥体的设计和放电条件有直接关系^[2]。因此,判断不同的能量输入方式、输入能量大小以及桥体设计下的放电行为是否产生等离子体,是 SCB 在应用中一个重要的基础问题。另一方面,研究 SCB 放电特性,如确定其放电温度和电子密度,对于研究 SCB 点火和起爆机理非常重要^[3-5]。但由于 SCB 放电时间为微秒级,且在常压下进行,很多温度诊断方法,如探针法、质谱法等都不适合于 SCB 放电温度的瞬态诊断^[6,7]。Benson 等基于 Planck 定律对 SCB 的放电温度进行了计算^[8],但只能获得某一特定时间下的温度的计算值,且计算中估算桥体材料辐射率为测试引入了不确定的因素。Kim 等^[9]使用微波共振探针法得到了 SCB 放电时电子密度随时间的变化规律,其测试环境为真空条件,所得到的结果与 SCB 在常压下应用时的实际大小并不

能等同。

根据原子发射光谱理论,在满足局部热力学平衡状态下,同种原子的两条特定原子谱线强度比与体系温度直接相关,这为原子发射光谱测温提供了理论依据。另外,原子线和离子线强度比的变化也反映出体系中电子的分布状态,据此也可以建立电子密度的诊断^[10]。因此,本研究采用原子发射光谱法实现了 SCB 放电温度和电子密度的同时诊断,并获得其温度和电子密度随时间分布结果。同时对 SCB 在不同输入能量下的光谱信号进行分析,根据等离子体的屏蔽特性和振荡特性^[11],从空间尺度和时间尺度判定等离子体的产生,从而为 SCB 点火条件的控制以及 SCB 的设计提供了理论依据。

1 原理

按照原子光谱理论,双谱线相对强度测温法建立以下体系温度和谱线强度之间关系的等式^[10]

$$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{E_2 - E_1}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) - \ln\left(\frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1}\right)} \quad (1)$$

在此基础上,根据 Boltzmann-Saha 方程可以得到电子密度和谱线强度之间的关系为^[11]

$$n_e = \frac{2I_2}{I_1} \frac{A_2 g_2 \lambda_1}{A_1 g_1 \lambda_2} \left(\frac{m_e k T}{2\pi h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_2 - E_{\text{ion}} + E_1}{kT}\right) \quad (2)$$

收稿日期: 2009-02-10, 修订日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50806033)资助

作者简介: 张琳,女,1976年生,南京理工大学化工学院讲师

e-mail: l_njust@yahoo.com.cn; waterlikelin@163.com

式中 I_i 为波长为 λ_i 的谱线的强度, 对于温度测量体系, 为两条原子谱线; 对于密度测量体系, 为离子和原子谱线。 A_i 为谱线的跃迁概率, g_i 为谱线激发态的统计权重, E_i 为谱线的激发态能量, k 为 Boltzmann 常数, T 为激发温度。 n_e 为等离子体的电子密度, E_{ion} 为离子的一次电离电位。

对于已知的两条谱线 I_i , A_i , g_i , E_i 和 k 均为已知的光谱常数, 因此只要测得上述谱线的谱线强度 I_i , 即可由上式求得温度 T 和电子密度 n_e 。

2 实验部分

本研究首先要得到 SCB 发射光谱全谱图。测量体系由 Acton Spectrapro. 2750 型双光栅光谱仪(美国 Acton Research Corporation)、ICCD(1 024×1 024 pixel)(美国 Acton Research Corporation)和数字延时发生器 DG535(美国 Stanford Research systems)组成。数据采用 Winspec/32 软件处理。

根据全谱图选择相应的谱线, 建立由光纤传导系统、滤光片、光电倍增管、高速响应电路以及数据采集组成的发射光谱测量系统。

测试选用了两种重掺杂多晶硅 Al 电极 SCB 桥, 其中 A 型 SCB 桥的电阻为 $(1.1 \pm 0.1) \Omega$, B 型 SCB 桥的电阻为 $(2.0 \pm 0.2) \Omega$ 。

3 结果与讨论

3.1 SCB 发射光谱

选择桥体电阻为 1.0Ω 的 A 型 SCB, 在电压为 30V, 充电电容为 $47 \mu\text{F}$ 条件下, 测得 SCB 的发射光谱图, 见图 1。可以看到, SCB 全谱图中出现了 Si 的原子线和离子线、Cu 的原子线、Al 和 Fe 的谱线。

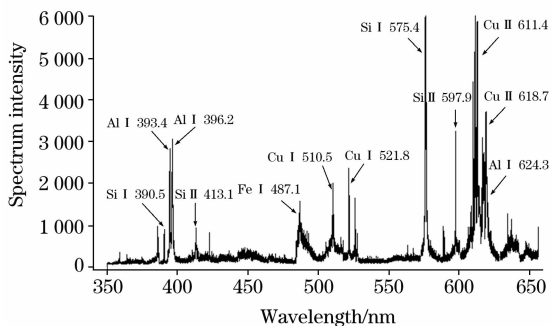


Fig. 1 Emission spectrum of SCB

根据得到的 SCB 发射光谱谱图, 本研究选择了谱线 Cu I 510.5 nm 和 Cu I 521.8 nm 进行温度测量, 选择谱线 Si I 390.5 nm 和 Si II 413.0 nm 进行电子密度测量, 从而建立 SCB 的光谱诊断系统。

3.2 SCB 放电温度和电子密度的诊断

用本研究中建立的原子发射光谱测量系统, 测量桥体电阻为 1.0Ω 的 A 型 SCB, 在放电电压为 20 V, 充电电容为

$47 \mu\text{F}$ 条件下, 放电时温度和电子密度随时间的变化曲线, 如图 2 和图 3 所示。可以看到, SCB 放电时温度分布在 2 500 ~ 4 300 K 之间, 电子密度约为 10^{16} cm^{-3} 左右, 持续时间为 $60 \mu\text{s}$ 左右。

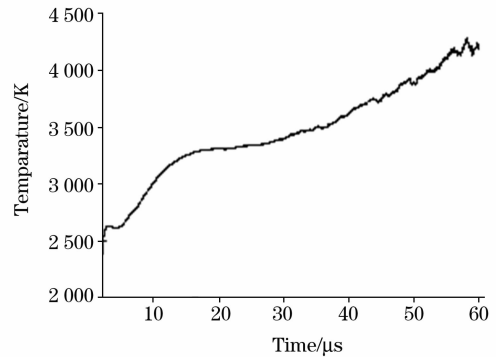


Fig. 2 SCB discharge temperature vs time

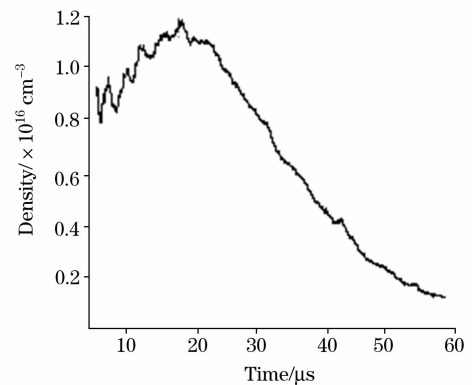


Fig. 3 SCB discharge electron density vs time

3.3 等离子体的判断

本研究中 SCB 点火时是否产生等离子体, 关系到 SCB 桥体的设计、点火的稳定性和一致性^[3, 4]。通过对 SCB 的光谱法诊断, 结合等离子体空间尺度和时间尺度的要求, 可以判断特定条件下是否产生了等离子体。这对于正确评价 SCB 性能具有重要意义。

由于在等离子体生成过程中, 带电粒子密度达到其建立的空间电荷足以限制其自身运动时, 带电粒子才会对体系性质产生显著影响, 这样密度的电离气体才能转变成等离子体^[11, 12]。也就是电离气体存在要达到时间和空间尺度的要求。其具体判据为: 等离子体的空间尺度 $L \gg \lambda_D$, 其中德拜长度 $\lambda_D = 6.9 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}$ 。等离子体存在的时间特征尺度条件为: $\tau \omega_p \gg 1$, 其中 ω_p 为等离子体振荡频率, $\omega_p = 8.9 \times 10^3 \sqrt{n_e}$ 。第三个判据即为 $N_D \gg 1$, 其中 N_D 为德拜球内粒子数, $N_D = 1380 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}$ 。

本研究对于对 A 型和 B 型两种半导体桥在不同放电条件下的测量结果进行分析, 具体结果见表 1。在放电电压为 16 V 和充电电容为 $47 \mu\text{F}$ 条件下, 在点火 $2 \mu\text{s}$ 这一时刻下,

A 型 SCB 点火温度为 3 000 K, 电子密度为 $4.0E14$, 相对应的德拜长度 λ_D 为 $1.89E-05$ cm, 实验中宏观尺寸 L 大约为 0.2 cm, $L \gg \lambda_D$ 等式成立, 表明在此条件下达到了等离子体电中性条件成立的最小空间尺度; 振荡频率 ω_p 为 $1.78E+11$, 在这一时刻下满足了等离子体的时间尺度条件 $\tau\omega_p \gg 1$; 等离子体参量 N_D 为 11.3, 也满足 $N_D \gg 1$ 这一条件。因此, 可以认定在点火 $2 \mu s$ 这一时刻下, A 型 SCB 点火所产生的电离气体满足了等离子体时间、空间和等离子体参量三个方

面的条件, 证实了等离子体的产生。对于同样点火条件下, B 型 SCB 点火所产生的电离气体温度和电子密度分别为 1 600 K 和 $2.6E6$, 其德拜长度 $\lambda_D \approx L$, 说明其产生的带电粒子不能满足等离子体产生所需要的空间尺度, 因此没有等离子体的产生。当提高 B 型 SCB 放电电压为 32 V 时, 在电容为 $47 \mu F$ 时, 测量点火 $2 \mu s$ 时的粒子温度和密度分别为 3 400 K 和 $2.8E14$, 依据等离子体的三个判据可以判断此种条件下 B 型 SCB 点火产生了等离子体。

Table 1 Judgment of different SCB discharge behavior

SCB 类型 及其点火条件	测量温度 T/K	测量密度 n_e/cm^{-3}	德拜长度 λ_D/cm	振荡频率 ω_p/s^{-1}	等离子体参量 N_D	结论
A 型 SCB, 电压为 16 V, 电容为 $47 \mu F$	3 000	$4.0E14$	$1.89E-05$	$1.78E+11$	11.3	是
B 型 SCB, 电压为 16 V, 电容为 $47 \mu F$	1 600	$2.6E6$	$1.71E-01$	$1.44E+07$	54 800	否
B 型 SCB, 电压为 32 V, 电容为 $47 \mu F$	3 400	$2.8E14$	$2.40E-05$	$1.49E+11$	164	是

4 结 论

本文利用原子发射光谱研究了 SCB 放电时温度和电子密度随时间分布的结果。结合等离子体时间尺度、空间尺度

和等离子体参量等判据, 对不同规格的 SCB 在特定放电条件下, 能否产生等离子体进行了判断。利用该方法对 SCB 等离子体温度和电子密度的诊断, 结合点火方式、点火能量、作用时间等参数, 为 SCB 点火的相关研究工作提供指导。该方法还可以应用到其他等离子体诊断和点火体系中。

参 考 文 献

- [1] Rossi C, Esteve D. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 120(3): 297.
- [2] Park M, et al. Sensors and Actuator A, 2004, 115(1), 104.
- [3] Richard A, Beyer R A. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 207.
- [4] Lee K N, Park M I, Choi S H P, et al. Sens. Actuators A, 2002, 96: 252.
- [5] Kim J U, Park C O, Park M, et al. Physics Letters A, 2002, 305(2): 413.
- [6] Spatenka P, Vlcek J, Blazek J. Vacuum, 1999, 55(2): 165.
- [7] Rego C A, Tsang R S. J. Appl. Phys., 1996, 79(2): 7264.
- [8] Benson D A, Larsen M E, Renfund A M, et al. J. Appl. Phys., 1987, 62(5): 1622.
- [9] Kim J, Nam K S, Jungling K C. IEEE Trans. Electron Devices, 1997, 44(6): 1022.
- [10] Aguilera J A, Aragón C. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(12): 1861.
- [11] ZHAO Hua-qiao(赵化侨). Plasma Chemistry and Process(等离子体化学与工艺). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1990. 15.
- [12] Demchenko V V, Hussein A M. Physics Letters A, 1973, 42(5): 379.

Research on SCB Discharge Behavior with Atomic Emission Spectroscopy

ZHANG Lin¹, FENG Hong-yan¹, ZHU Shun-guan¹, WU Rong², ZHANG Wen-chao¹

1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China

2. Department of Chemistry, Chaohu University, Chaohu 238000, China

Abstract Semiconductor bridge (SCB) was utilized to ignite energetic materials with thin film discharge and characterized of low input energy, high safety and logic control possibility. SCB discharge was diagnosticated with atomic emission spectroscopy. Firstly, discharge temperature was acquired with copper atom spectral lines 510.5 and 521.8 nm, and electron density was calculated with silicon atom spectral line 390.5 nm and corresponding ion line 413.0 nm. As for resistance 1.0Ω of SCB with the discharge voltage of 20 V and capacity of $47 \mu F$, its discharge temperature was about 2 500-4 300 K and electron density 10^{16}

cm^{-3} . Meanwhile, the temperature and density V_s time distributions were acquired simultaneously. And then with the diagnosis results, the discharge behaviors of two sorts of SCB were judged according to plasma space-dimension and time-dimension restrictions. This research set up an efficient technique for the diagnosis of transient small-size discharge behavior and provided instructions for the design of SCB and discharge condition.

Keywords Atomic emission spectroscopy; Temperature diagnosis; Density diagnosis; Plasma criterion; SCB discharge

(Received Feb. 10, 2009; accepted May 12, 2009)

中国科技核心期刊
CODEN: YACEEK

《岩矿测试》

ISSN 0254—5357
CN 11—2131/TD

欢迎订阅 欢迎投稿 承接广告

《岩矿测试》是中国地质学会岩矿测试专业委员会和国家地质实验测试中心共同主办的分析测试技术科技期刊。国际标准刊号: ISSN 0254—5357; 国际刊名代码 CODEN: YACEEK; 国内统一刊号: CN 11—2131/TD。

《岩矿测试》的宗旨是突出服务于地球科学和地质找矿事业以及促进岩矿测试技术的发展; 根据国家地质工作的重点由单一资源向资源环境并重的转变, 《岩矿测试》的内容有所拓宽, 主要报道国内与分析科学、资源环境、地球科学相关的新技术、新方法、新理论和新设备等研究成果、动态、评述及相关实践经验。

《岩矿测试》于 1982 年创刊, 国内外公开发行。近年来刊物地位不断提高, 是中文核心期刊, 中国科技核心期刊, 中国期刊方阵双效期刊, 中国科技论文统计源期刊, 美国《化学文摘》、美国《剑桥科学文摘》、英国《分析文摘》、俄罗斯《文摘杂志》等数据库收录期刊。曾先后被评为国家、原地矿部、北京市、中国科协的优秀科技刊物。适合于地质、冶金、环保、石油、化工、煤炭等部门从事分析测试的科技工作者及大专院校分析化学、环境资源、地球科学等相关专业的师生阅读。

《岩矿测试》为双月刊, 大 16 开版本, 逢双月出版; 国内邮发代号 2—313; 国际书店发行代号 BM4089; 广告经营许可证: 京西工商广字第 0227 号; 定价 10.00 元/本, 全年 60.00 元。漏订的读者可直接与编辑部联系。

《岩矿测试》编辑部地址: 北京西城区百万庄大街 26 号

国家地质实验测试中心(邮政编码 100037)

电话: 010-68999562; 68999563 传真: 010-68999563

E-mail: ykcs_zazhi@163.com; ykcs_zazhi@sina.com

《岩矿测试》网站(在线投稿): <http://www.ykcs.ac.cn>