

文章编号: 1000-7032(2019)04-0528-07

# 氢气、氢气/硅烷等离子体时间分辨光发射谱的研究

张发荣<sup>1\*</sup>, 张晓丹<sup>2</sup>, AMANATIDES E<sup>3</sup>, 赵颖<sup>2</sup>

(1. 天津职业大学 生物与环境工程学院, 天津 300410;

2. 南开大学 光电子薄膜器件与技术研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室(南开大学), 天津 300071;

3. 希腊帕特雷大学 等离子体技术实验室, 希腊 帕特雷 26500)

**摘要:** 为了加深对等离子体增强化学气相沉积的认识, 采用增强型电荷耦合器件 (ICCD) 研究了氢气及氢气/硅烷混合气体在不同气压条件下的时间分辨光发射谱, 获得了辉光放电等离子体瞬态微观动力学过程的清晰图像。纯氢气辉光条件下, 在一个射频周期内,  $H_{\beta}$  时间分辨光发射谱出现了 4 个峰。分析表明其中两个峰是由电子冲浪效应引起, 额外两个峰的出现是由瞬时阳极时刻存在额外电场所致。另外, 可观察到随着气压的增大, 体欧姆加热效应增强。同氢气相比, 当硅烷引入后,  $H_{\beta}$  时间分辨光发射谱由原来 4 个明显发射峰变成了两个明显发射峰。

**关键词:** 等离子体; 光发射谱; 微观动力学

中图分类号: O461.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20194004.0528

## Time Resolved Optical Emission Spectrum for Hydrogen and Hydrogen/Silane Plasma

ZHANG Fa-rong<sup>1\*</sup>, ZHANG Xiao-dan<sup>2</sup>, AMANATIDES E<sup>3</sup>, ZHAO Ying<sup>2</sup>

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China;

2. Institute of Photo-electronics Thin Film Devices and Technique, Devices and Technique of Tianjin, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, EMC, Nankai University, Tianjin 300071, China;

3. Plasma Technology Laboratory, Department of Chemical Engineering University of Patras, Patras 26500, Greece)

\* Corresponding Author, E-mail: 45668032@qq.com

**Abstract:** The spatial and temporal resolved optical emission spectrum (OES) has been studied by ICCD for hydrogen and hydrogen/silane mixture gas, in order to deepen the understanding of the plasma enhanced chemical vapor deposition. Plasma clear microcosmic dynamics figures of instantaneous glow discharge have been obtained. In pure  $H_2$  plasma, there appear four peaks in one radio frequency cycle. Two of these peaks are formed by electron wave-riding effect, and the other two peaks are caused by the extra electric field which is formed at the instantaneous anode. This phenomenon validates and extends the traditional radio frequency plasma discharge dynamics theory. In addition, from the picture, it can be found that the bulk Ohmic heating mechanism increases with pressure. When introducing the silane into the hydrogen, the four clear peaks change to two clear peaks.

收稿日期: 2018-05-01; 修订日期: 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(60506003); 天津市自然科学基金(05YFJMJC01600); 天津职业大学校基金项目(20171101)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China(60506003); Tianjin Natural Science Foundation Project(05YFJMJC01600);  
Tianjin Vocational Institute Foundation Project(20171101)

**Key words:** plasma; optical emission spectroscopy; microcosmic dynamics

## 1 引言

硅烷/氢气等离子体沉积在硅基太阳能电池中有着重要应用。由于氢气/硅烷等离子体中的反应粒子众多,相互之间的作用极为复杂,使得等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术制备硅基薄膜的微观过程十分复杂。对硅基薄膜制备过程中等离子体进行在线监测,揭示反应气体辉光放电过程中的内在物理过程<sup>[14]</sup>,对薄膜及制备工艺的可控性、可重复性研究,具有十分重要的意义。

发光特性是等离子体的一个重要性质。采用光发射谱(OES)测量技术对等离子体辉光的发光光谱进行分析,能够对等离子体中的生成物进行判别;并可以定性地分析、比较各个生成物由外界参数的变化引起的变化趋势;也可以根据各生成物发光强度的空间变化,分析电子的加热机制,探讨沉积机理,探寻提高薄膜质量的途径<sup>[5]</sup>。

OES测量技术装置简单,探测在沉积系统的外部进行,对沉积系统的干扰很少,因此在等离子体诊断中得到了非常广泛的应用。通过OES的诊断可以定性表征薄膜晶化率<sup>[6]</sup>、等离子体的电子温度<sup>[1-2]</sup>、鞘层特性<sup>[3]</sup>及预测薄膜孵化层<sup>[7]</sup>。随着测试技术的进步,OES测试由单点分辨<sup>[8]</sup>逐步发展到空间分辨<sup>[9]</sup>,继而出现了时间分辨功能<sup>[4,10-15]</sup>。利用OES的时间分辨功能主要是研究等离子体辉光放电结构和电子的加热机制。Tochikubo<sup>[4]</sup>通过时间、空间分辨光发射谱,发现在射频13.56 MHz的条件下,硅烷/氢气辉光放电存在3种激发:(1)鞘层加热电子形成的激发;(2)体电场加速电子形成的激发;(3)瞬时阳极时刻等离子体-鞘层边界存在电场加速电子形成的激发。Mahony结合时间分辨光发射谱和等离子体电势测量发现:在非对称电容耦合放电中,电极附近存在的发射峰(Double layers现象)是由反向电场引起的,而反向电场又是由碰撞引起电子滞留造成的<sup>[13-14]</sup>。Czarnetzki应用激光谱电场测量法观测到瞬时阳极时刻存在的反向电场,解释了时间分辨光发射谱(采用ICCD测量)观测到氢气发光存在的Double layers现象,并采用模拟对该现象做了进一步阐述<sup>[15]</sup>。总的来说,目前对氢气

及氢气/硅烷辉光放电时间分辨研究还不够多,系统性研究的文章则更少。

在硅基薄膜的沉积过程中,利用OES法在硅烷、氢气等离子体中能够监测的产物有Si、H<sub>2</sub>、SiH、H的发光峰,它们对应的特征发光峰的波长分别是:Si\* ~ 288 nm, H<sub>2</sub>\* ~ 602 nm, SiH\* ~ 412 nm, H<sub>β</sub> ~ 486 nm 和 H<sub>α</sub> ~ 656 nm<sup>[4,7,16-17]</sup>。从各个发光基团的寿命和能量阈值考虑,实验采用H<sub>β</sub>发射谱进行测试分析。

## 2 实验

### 2.1 ICCD测试原理

ICCD是Intensified charge coupled device的简称,中文为增强型电荷耦合器件。其对光学信号时间分辨的门宽小于2 ns,时间分辨率很高,因此是一种增强型的CCD。该ICCD既具有空间分辨功能,也具有时间分辨功能,是很先进的测试仪器。

由于ICCD的时间分辨率高达2 ns,所以可以用于研究一个射频周期内的光发射谱特性。它采用外部触发控制光门开启,门宽与延时通过自带软件设定完成。图1即为完成一个射频周期测量的外部触发示意图。本文实验功率源频率采用13.56 MHz,外部触发信号频率为13.56 kHz。实验采用如下步骤完成一个周期测量:时间0时刻,外部触发信号第一次开启光门,ICCD开始记录光发射谱,通过软件设定延时时间为0,门宽为3.5 ns(实验采用的曝光时间),即外部信号触发后延时0 s、曝光3.5 ns之后自动关闭光门。实验获得第一个数据点,它完成了一个射频周期0~3.5 ns时间段的光发射谱的测量。外部触发信号周期时间为功率源周期时间的1 000倍,即至少经过1 000个射频周期后外部触发信号再次开启光门。此时将延时设定为3.5 ns,即外部触发信号触发后再延时3.5 ns开启光门,它对应图1中射频周期1'位置,曝光时间3.5 ns之后光门自动关闭。实验获得第二个数据点,它完成了一个射频周期3.5~7 ns(图1中1'~2区间所示)时间段的光发射谱的测量。依次对随后的数据采集,则将延时调整为(n-1)×3.5 ns。如采集第三点,则延时2个3.5 ns(为7 ns),采集第四点,则延时3

个 3.5 ns (为 10.5 ns), 直至测至 73.8 ns。完成一个射频周期的测量总共需要 21 个数据点, 亦即一个周期数据的采集, 实际上是依次采集 21 个 3.5 ns 正弦波各对应时段上的数据, 最终累积组成一个完整的周期数据。

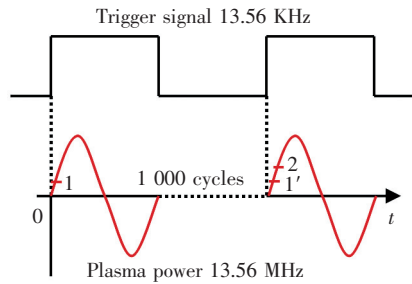


图 1 外部触发与内部延时控制, 完成一周期光发射谱测量示意图。

Fig. 1 Sketch map of external trigger and internal delay control to complete a periodic light emission spectrum measurement

等离子体空间分辨光发射谱的实验光路上设有两道狭缝和滤波片。两道狭缝限定等离子体发射光谱入射的垂直空间, 让垂直于狭缝的平行光通过, 而滤掉非平行光。滤波片过滤掉其他波段光谱只允许  $H_{\beta}$  的光谱通过。整个测试光路的外部罩有一个黑盒子, 它一方面可以阻止外部光线对光路的干扰, 另一方面可以吸收光路中夹杂的非平行光。

## 2.2 实验条件的选取

电子由于其质量轻, 可对电场产生瞬时响应。因此, 随着电极外加正弦周期电压的变化, 电场也呈现出周期变化; 电子受电场加速获得能量及与气体分子发生碰撞对外传递能量, 也呈现出周期性变化规律。分辨率为几纳秒的快速成像技术可以用来研究等离子体射频周期内某一时刻等离子体光发射谱。测量一个周期的光发射谱, 就可以阐明高于能量域值的电子运动行为, 并可以洞察到占主导地位的电子加热机制。

若研究等离子体一个射频周期内的发光特性, 需要发光基团寿命短于一个射频周期。实验中发光基团选择  $H_{\beta}$  寿命为 12 ns, 发射谱形状和其产生基团形状基本相同。因此,  $H_{\beta}$  发射谱可以揭示在射频 13.56 MHz 条件下, 能量高于 17.2 eV<sup>[4,9,18]</sup> 的电子输运情况, 从而在一定程度上揭示出辉光的机制问题。

对于时间和空间分辨测试光发射, 采用电容耦合等离子体发生器, 功率电源采用的电压激励方式:  $V(t) = V_{FR} \sin(\omega t)$ 。时间测试采用的时间间隔是: 3.5 ns。实验分为两个系列: (1) 纯氢气系列; (2) 氢气/硅烷混合气体的系列。

对于(1)纯氢气实验系列, 实验中预先固定的条件是: 衬底电极良好接地, 功率电极电压幅值维持恒定 150 V, 气压在 66.66 ~ 999.9 Pa (0.5 ~ 7.5 Torr) 之间变化。

考察(2)引入硅烷系列的研究时, 衬底电极良好接地, 硅烷浓度固定在 4%, 气压 333.3 Pa (2.5 Torr), 辉光功率 35 W, 气体总流量 400 mL/min。

以上实验电源频率均为 13.56 MHz。

## 3 结果与讨论

### 3.1 纯氢气等离子体光发射谱

图 2 及图 3 给出了不同反应气压条件下, 纯氢气等离子体  $H_{\beta}$  发射基团在两电极间、一个射频周期 (73.8 ns) 时间内的变化趋势。其中纵坐标表示电极距离, “0” 对应功率电极的位置, 1.5 cm 处对应衬底电极位置, 两电极间距离为 1.5 cm; 横坐标表示一个射频周期的时间坐标。图中颜色表示发射谱强度, 由蓝到红强度逐渐增大。很明显, 气压对其整个空间和时间的分布状况有明显的影响。从时间上分析, 在所研究的气压范围内, 发射强度(1)的最大值(各图上的发光强度(1)代表的谱峰)差不多均出现在 3/4 个周期之前约 6 ns 附近。也就是说, 发射谱的最强峰时刻, 从位置上对应于功率电极附近、时间上处于负半周上升沿接近峰值前 6 ns 的时刻, 而不是在电源电压负半周期的峰值时刻。即发射峰出现在功率电极处于瞬时阴极、电压幅值处于上升 ( $T/2 \sim 3T/4$ ) 时刻、鞘层厚度为扩张的状态下。光发射强度(1)峰值的产生是由在功率电极处于瞬时阴极时刻、电子受正弦波负半周鞘层扩张的冲浪效应而引起的。电容耦合等离子体是通过外部施加的高频电场对电子的加速作用来引起电离的。电子由于质量轻, 对高频电场能够产生瞬时反应。随着电场的变化, 电子群像冲浪者乘着波浪朝岸边冲过来一样向左边或者右边的电极移动, 称为冲浪效应<sup>[19]</sup>。

图 2 及图 3 中发射峰虽然均出现在约 49.2



ns 时刻,但进一步观察它们所出现的时间,随着气压还有一定的变化规律。发射峰出现的时刻不同,对应的电子受到等离子体鞘层的平均加热时间不同。所需产生激发峰的加热时间随气压变化:气压低时,时刻靠近  $3T/4$ ,即要求较长的平均加热时间;但随气压升高,该时刻向  $T/2$  移动,即平均加热时间缩短;超过  $333.3 \text{ Pa}$  ( $2.5 \text{ Torr}$ ) 之后,发射峰出现的时刻又开始向  $3T/4$  处移动,即平均加热时间又增加。产生这种情况的原因是:当气压较低时,反应气体分子数较少,电子密度较低,电子碰撞激发的几率低,需要更长时间加热更多的电子才容易产生激发峰,因此产生激发峰所需的时刻向  $3T/4$  周期偏移。随气压增大,反应物分子数增多,电子密度增大,单位时间内受鞘层加热的电子数增多,因此所需时间反而降低,于是出现最强峰的时刻超前,呈现时间由长到短的变化过程。但是当气压高到一定程度(例如实验的  $333.3 \text{ Pa}$  ( $2.5 \text{ Torr}$ ))以后,因碰撞过于频繁,能量损失大,平均电子温度降低,单位时间内具有碰撞激发电离能力的电子数目减少,因此需要更长的时间进行积累,最终发射峰出现的时刻向着大于  $3/4$  个周期的方向移动。

从空间分布的角度分析,从图 2 及图 3 光发射谱相对于纵轴的关系,可以观察到随着气压增大,发射峰位逐渐由两电极中心位置向功率电极移动。出现这种现象的原因与电子的平均自由程有关。气压较低条件下,电子平均自由程长,可以运动较远的距离再与氢发生碰撞激发,因此发射峰出现在中心位置,且各个发射峰有重叠现象。随着气压增大,电子碰撞几率增大,平均自由程变小,高能电子在很短的距离内就与氢气发生碰撞分解、激发。此时可以认为发射谱峰对应于功率电极鞘层的边界。因此,发射峰中心位置与功率电极鞘层的距离,可以间接地反映功率电极平均鞘层厚度。上面的结果表明,随气压增加,鞘层的厚度单调减小。

有报道认为<sup>[20]</sup>:等离子体鞘层厚度和电子的数目成反比,而与电子温度成正比。气压增加时,因碰撞会使电子温度降低,从而鞘层厚度减小,谱峰最大值逐步靠近功率电极。从图中同时可见,无论相对电极位置还是随电压幅值,最大值的范围都是在不断缩小。这说明气压增加,随着电子与各个物种碰撞几率的增大,通过能量交换,一方

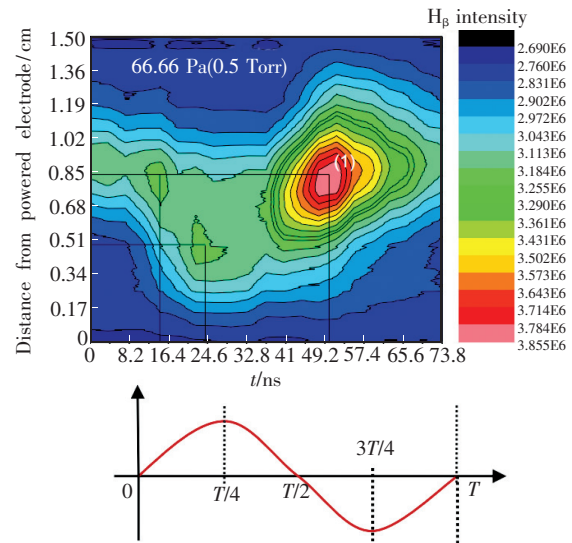


图 2 66.66 Pa (0.5 Torr) 气压条件下,纯氢气等离子体中  $H_{\beta}$  在一个射频周期内的发射强度空间分布。(注:横坐标:一个射频周期的时间坐标,纵坐标:距离功率电极的距离。另外,为方便观察发射峰的坐标,图中用黑实线进行了标注。本小注也适用于图 3。)

Fig. 2 Spatial distribution of  $H_{\beta}$  emission intensity in a radio-frequency cycle under 66.66 Pa (0.5 Torr) pure hydrogen plasma condition. (The abscissa: the time coordinate of a radio-frequency cycle. The ordinate: the distance from the power electrode. In order to conveniently observe the coordinates of emission peaks, annotation is made with black solid line. This note is suitable for Fig. 3.)

面使得电子由加速获得的能量趋于平均;另一方面,因碰撞几率增大,能量损失增多,能量平均值也相应降低,于是有能力将氢碰撞到激发态的几率也减小。也正因为电子获得能量逐渐趋于平均,故而所需要的激发能量(即对应正弦波一个周期内的各个时刻所对应的电压幅度)也就较为接近,与电极位置的起伏也相应缩小。

另外,从图 3 中我们看出:除了靠近功率电极在 49.2 ns 时刻附近,出现一个最大值的位置外,随着气压的增加,仅次于功率电极,衬底电极附近的谱峰(峰 2)强度先增加,到  $999.9 \text{ Pa}$  ( $7.5 \text{ Torr}$ ) 时,又进一步降低。而且前面功率电极附近的最大峰值强度也是在  $999.9 \text{ Pa}$  ( $7.5 \text{ Torr}$ ) 的时候呈现出了降低的趋势。主要的原因是:这一系列气压变化是通过傅立叶变换功率阻抗分析仪,保持恒定的峰值电压而进行的测试分析研究,电学特性的测试结果显示气压为  $999.9 \text{ Pa}$  ( $7.5 \text{ Torr}$ ) 时,辉光的功率和电流降低。对于衬底电极,最强

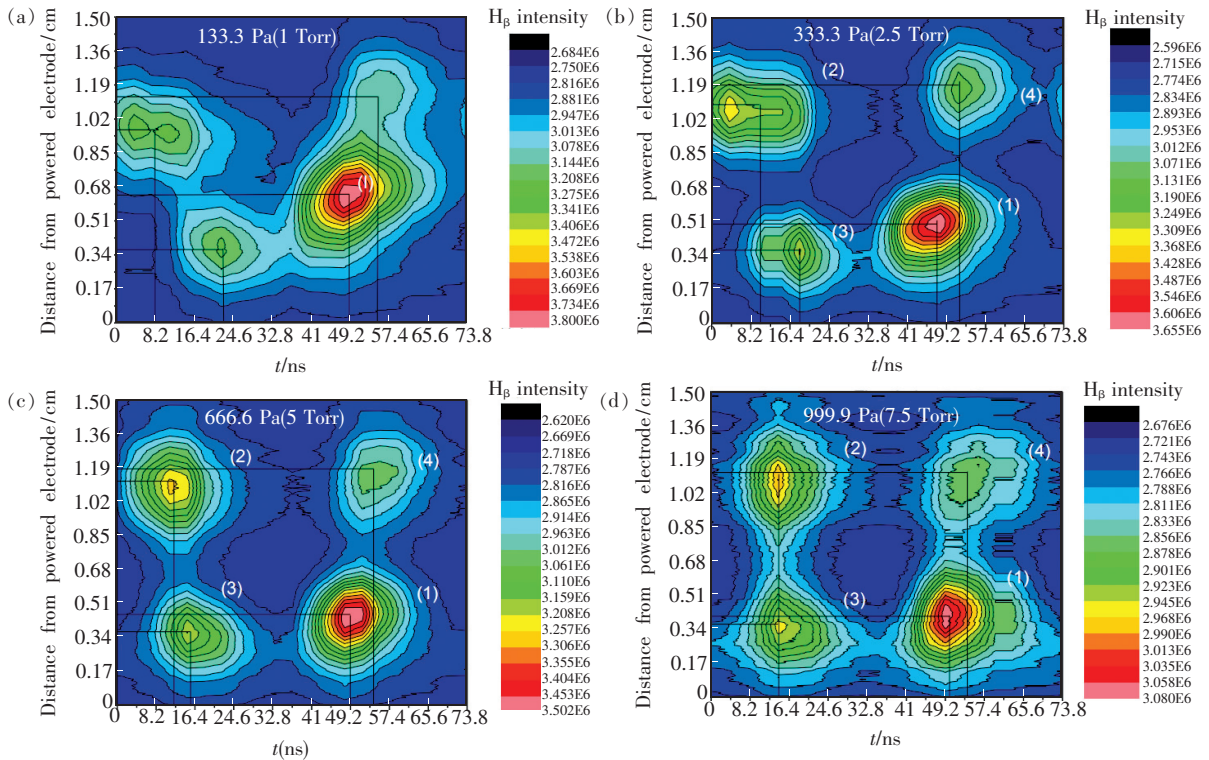


图3 133.3 Pa(1 Torr) (a)、333.3 Pa(2.5 Torr) (b)、666.6 Pa(5 Torr) (c)、999.9 Pa(7.5 Torr) (d)气压条件下纯氢气等离子体中  $H_{\beta}$  在一个射频周期内发射强度的空间分布。

Fig.3 Spatial distribution of  $H_{\beta}$  emission intensity in a radio-frequency cycle under 133.3 Pa(1 Torr) (a), 333.3 Pa(2.5 Torr) (b), 666.6 Pa(5 Torr) (c), 999.9 Pa(7.5 Torr) (d) pure hydrogen plasma condition.

的发光峰位置也是随着气压的增加逐渐向衬底电极靠近。另外,除了 133.3 Pa(1 Torr)外,其他气压都是在约 12.5 ns 的位置出现最大值,该时刻超前于  $T/4$  射频周期前约 6 ns,亦即对应的是衬底电极处于瞬时阴极、电压处于上升沿、鞘层扩张时刻。因此,对于功率电极和衬底电极,所对应的光发射谱峰的产生是电子在该处的冲浪效应引起的。

图3中除了上面两个发射比较强的峰之外,还有另外两个峰(峰3和4)。相比而言,接近功率电极的峰强度显得稍大。首先来分析一下第3号峰位。同样谱峰强度随气压增加有略微增加的趋势,但 999.9 Pa(7.5 Torr)时强度又降低。而且该峰对应的一个周期内的时刻是变化的,随气压增加峰位产生的时刻逐步降低,333.3 Pa(2.5 Torr)时该峰位约在一个射频周期的  $T/4$  处。除了 66.66 Pa(0.5 Torr)外,该峰位距功率电极的位置几乎是不变。而对于发射峰位4,在低气压 66.66 Pa(0.5 Torr)时并没有出现,而一旦出现后,其峰位对应的时刻基本上都在一个射频周期的  $3T/4$  处,而且峰位置距衬底电极的距离基本不

变。通过上面的分析可以看出:对于功率电极和衬底电极又出现的两个峰(峰3和4),所产生的物理机制不同于峰1和2。这说明在氢气中存在着额外的电子加热机制。

其实,图3中出现的峰位3和4,即为在  $H_{\beta}$  发射峰中观测到的双峰现象(Double layers)<sup>[9,21-22]</sup>。谱峰3位于功率电极附近,出现在功率电极瞬时阳极(正弦波正半周期)、鞘层收缩时刻;谱峰4位于衬底电极附近,出现在功率电极处于瞬时阴极(正弦波负半周期)、衬底电极瞬时阳极时刻。峰3和4是由瞬时阳极时刻存在的额外电场产生的,与峰1和2的加热机制不同。对于该额外电场文献[13-15]中已有报道,但其产生的原因说法不统一。本文认为只要能在放电等离子体内部产生另一个瞬时电场,就可能使得在该额外电场中运动的电子再次受到加速,导致近距离区域内的激发,而出现额外发射峰。

### 3.2 氢气/硅烷等离子体光发射谱

同样的气压条件下(333.3 Pa(2.5 Torr)),通过 ICCD 光谱诊断系统比较了引入硅烷时,等离子体中的发射光谱的空间和时间分辨情况,具

体如图4所示。结果表明,同氢气相比,一旦引入硅烷后,光发射谱由原来4个明显的强发射峰变成了两个明显的强发射峰,且每一强发射峰在电极间覆盖面积增大。这主要是由于硅烷气体分子

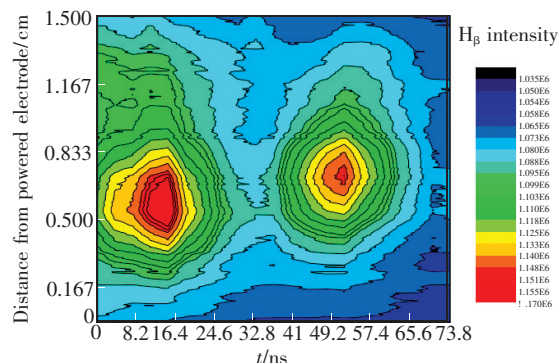


图4 氢气/硅烷等离子体中  $H_{\beta}$  在一个射频周期内的空间分布变化

Fig.4 Spatial distribution of  $H_{\beta}$  emission intensity in a radio-frequency cycle hydrogen/silane plasma condition

相对于氢气来说碰撞截面大很多,使得电子在等离子体中与硅烷碰撞几率增大,从而使体欧姆加热效应增强而造成的。

## 4 结 论

采用时间分辨光发射谱研究了纯氢气辉光一个射频周期内电子的加热机制。 $H_{\beta}$  时间分辨光发射谱测试表明:不同气压条件下,等离子体中的电子加热机制不同,低气压下,等离子体中的主要加热机制是电子冲浪效应;随着气压增大,体欧姆加热效应增强。纯氢气辉光条件下,出现了4个峰,额外两个峰的出现是由于瞬时阳极时刻存在额外电场所致。

同氢气相比,当引入硅烷后, $H_{\beta}$  时间分辨光发射谱由原来4个明显发射峰变成了两个明显发射峰。这主要是由于体欧姆加热的增强,使两个峰互相靠近而引起的。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] TAKAI M, NISHIMOTO T, KONDO M, *et al.*. Effect of higher-silane formation on electron temperature in a silane glow-discharge plasma [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(18):2828-2830.
- [ 2 ] NIIKURA C, KONDO M, MATSUDA A. High rate growth of device-grade microcrystalline silicon films at 8 nm/s [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2006, 90(18-19):3223-3231.
- [ 3 ] MATARAS D, CAVADIAS S, RAPAPOULIAS D. Spatial generation profiles of active radicals in plasma-enhanced CVD of a-Si:H [J]. *MRS Proc.*, 1989, 165:55.
- [ 4 ] TOCHIKUBO F, SUZUKI A, KAKUTA S, *et al.*. Study of the structure in rf glow discharges in  $SiH_4/H_2$  by spatiotemporal optical emission spectroscopy: influence of negative ions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68(11):5532-5539.
- [ 5 ] 王莉, 赵艳娥, 赵福利, 等. a-SiC<sub>x</sub>:H/nc-Si:H 多层薄膜的室温时间分辨光致可见发光 [J]. *发光学报*, 2004, 25(6):696-700.  
WANG L, ZHAO Y E, ZHAO F L, *et al.*. Time resolution photoluminescence of a-SiC<sub>x</sub>:H/nc-Si:H multi-layers at room temperature [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2004, 25(6):696-700. (in Chinese)
- [ 6 ] FUKUDA Y, SAKUMA Y, FUKAI C, *et al.*. Optical emission spectroscopy study toward high rate growth of microcrystalline silicon [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 386(2):256-260.
- [ 7 ] FEITKNECHT L, MEIER J, TORRES P, *et al.*. Plasma deposition of thin film silicon; kinetics monitored by optical emission spectroscopy [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2002, 74(1-4):539-545.
- [ 8 ] 杨恢东, 吴春亚, 朱锋, 等. 射频辉光放电硅烷等离子体的光发射谱研究 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14(4):375-379.  
YANG H D, WU C Y, ZHU F, *et al.*. Optical emission spectroscopy investigation on the RF-generated  $SiH_4$  plasma [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2003, 14(4):375-379. (in Chinese)
- [ 9 ] AMANATIDES E, MATARAS D, RAPAPOULIAS D, *et al.*. Plasma emission diagnostics for the transition from microcrystalline to amorphous silicon solar cells [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2005, 87(1-4):795-805.
- [ 10 ] DE ROSNY G, MOSBURG JR E R, ABELSON J R, *et al.*. Evidence for a time dependent excitation process in silane radio frequency glow discharges [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(5):2272-2275.
- [ 11 ] MAKABE T, NAKANO N. Modeling and diagnostics of the structure of rf glow discharges in Ar at 13.56 MHz [J]. *Phys.*



- Rev. A*, 1992,45(4):2520-2531.
- [12] FLOHR R,PIEL A. Time- and space-resolved optical emission spectroscopy of a Helium RF discharge; investigation of fast secondary electrons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993,70(8):1108-1111.
- [13] MAHONY C M O,AL WAZZAN R,GRAHAM W G. Sheath dynamics observed in a 13.56 MHz-driven plasma [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997,71(5):608-610.
- [14] MAHONY C M O,GRAHAM W G. Heating modes in capacitively coupled RF plasmas observed with emission spectroscopy [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999,27(1):72-73.
- [15] CZARNETZKI U,LUGGENHÖLSCHER D,DÖBELE H F. Space and time resolved electric field measurements in helium and hydrogen RF-discharges [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1999,8(2):230-248.
- [16] 张晓丹,赵颖,朱锋,等. VHF-PECVD 低温制备微晶硅薄膜的拉曼散射光谱和光发射谱研究 [J]. *物理学报*, 2005,54(1):445-449.
- ZHANG X D,ZHAO Y,ZHU F,*et al.*. A study of Raman and optical emission spectroscopy on microcrystalline silicon films deposited by VHF-PECVD [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2005,54(1):445-449. (in Chinese)
- [17] YANG H D,WU C Y,HUANG J K,*et al.*. Optical emission spectroscopy investigation on very high frequency plasma and its glow discharge mechanism during the microcrystalline silicon deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2005,472(1-2):125-129.
- [18] LEROY O,STRATIL P,PERRIN J,*et al.*. Spatiotemporal analysis of the double layer formation in hydrogen radio frequency discharges [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995,28(3):500-507.
- [19] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学 [M]. 张海波,张丹,译. 北京:科学出版社, 2002:108-118.
- HIRO K. *Plasma Electronics Engineering* [M]. ZHANG H B,ZHANG D,trans. Beijing:Science Press, 2002:108-118. (in Chinese)
- [20] TOCHIKUBO F,MAKABE T,KAKUTA S,*et al.*. Study of the structure of radio frequency glow discharges in CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> by spatiotemporal optical emission spectroscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992,71(5):2143-2150.
- [21] GODYAK V A,PELJAK R B,STERNBERG N. A comparison of RF electrode sheath models [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1993,21(4):378-382.
- [22] FLAMM D L,DONNELLY V M. Time-dependent excitation in high- and low-frequency chlorine plasmas [J]. *J. Appl. Phys.*, 1986,59(4):1052-1062.



张发荣(1979-),女,天津人,博士,副教授,2008年于南开大学获得博士学位,主要从事薄膜光电子材料与器件的研究。

E-mail: 45668032@qq.com