

甚高频等离子体增强化学气相沉积大面积平行板 电极间真空电势差分布研究^{*}

葛 洪^{1)†} 张晓丹¹⁾ 岳 强¹⁾ 赵 静²⁾ 赵 颖¹⁾

1) 南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室,

光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) 天津新华职工大学, 天津 300040)

(2007 年 9 月 12 日收到, 2008 年 3 月 6 日收到修改稿)

采用二维准平面电路模型研究了甚高频等离子体增强化学气相沉积(VHF-PECVD)大面积平行板电极间真空电势差分布. 计算结果表明, 随平行板电极尺寸增加和激发频率提高, 电势驻波效应成为影响电极间电势差非均匀分布的重要因素. 在尺寸为 $1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的大面积平行板电极上应用 40.68 和 60 MHz 两种激发频率, 通过功率馈入点数量和位置优化, 计算获得非均匀性分别为 $\pm 2.5\%$ 和 $\pm 5.5\%$ 的真空电势差分布. 这些数值计算结果为大面积平行板电极在 VHF-PECVD 中应用提供了重要的理论指导.

关键词: 二维准平面电路模型, 甚高频等离子体增强化学气相沉积, 电势驻波效应

PACC: 5235H, 5240D

1. 引 言

等离子体增强化学气相沉积(PECVD)是被广泛用于低温沉积高质量薄膜的一种很好方法. 标准 13.56 MHz 射频激发的电容耦合平行板电极 PECVD 反应室通常被用来进行大面积薄膜沉积或大面积半导体等离子体刻蚀. 在工业应用上, 射频激发的平米级 PECVD 矩形反应室用作薄膜光伏太阳能电池和用于平板显示的薄膜晶体管的制备. 这些应用的典型要求是薄膜厚度非均匀性在 $\pm 10\%$ 之内^[1].

近些年来大量的实验和数值模拟研究表明, 采用高于 13.56 MHz 激发频率的甚高频(VHF)(30—300 MHz)技术有更多的优势, 如低电子温度、高等离子体密度, 并可以降低鞘层电压, 减轻等离子体离子轰击^[2], 在高速率沉积下获得高质量的薄膜材料^[3]. 然而, VHF 技术目前主要应用在小尺寸 PECVD 反应室^[4-6]. 为了满足当前提高工业生产效率和进一步降低成本的要求, 需要将 VHF 技术应用到大尺寸 PECVD 反应室.

VHF 技术应用于大面积平行板电极 PECVD 反应室, 实现大面积薄膜均匀沉积是一个技术难题. 在 13.56 MHz 射频激发的大面积平行板电极 PECVD 反应室中, 影响薄膜均匀沉积的因素也有很多^[7-10], 比如基底与电极的非理想接触、不恰当的气流分布、等离子体中存在粉尘颗粒污染、电极的不对称等等. 这些非均匀源在更高激发频率下同样也会存在. 但是, 由这些非均匀源产生的非均匀性, 通常通过反应室的合理设计和适当的工艺参数调整可以得到部分或全部解决. 然而, 随着应用于大面积 PECVD 反应室激发频率的提高, 可能会因为多种电磁场效应而导致其他非均匀源出现^[11-13], 如电势驻波效应、趋肤效应等. 特别是在传统电容耦合平行板电极 PECVD 反应室或梯型电极 PECVD 反应室中, 当电源所激发的电磁波的波长与反应室电极尺度可比较时, 电极间电势驻波效应产生的非均匀性已不可忽略^[14-17]. 为了消除或抑制电极间的电势驻波效应, 研究人员已提出一些新型电极结构和技术, 如高斯形电极结构^[13, 17]、梯形电极相位调制技术^[14, 15]等.

在本文中, 我们主要应用二维准平面电路模

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB202602, 2006CB202603) 国家自然科学基金(批准号: 60506003) 科学技术部国际合作计划重点项目(批准号: 2006DFA62390) 和国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA05Z436) 资助的课题.

[†] E-mail: gehong@mail.nankai.edu.cn

型^[18]研究了大面积平行板电极 PECVD 反应室电极间的电势差分布均匀性随电极尺寸增加和激发频率提高受电势驻波效应的影响,并采用四点功率馈入方式,通过优化馈入点位置初步考察了功率馈入方式对大面积平行板电极间电势差分布均匀性的影响。

2. 模型与方法

本文采用二维准平面电路模型计算 PECVD 两平行板电极间的电势差分布.二维准平面电路模型忽略了电极边缘的电磁场分布细节,仅考虑电磁场在电极中央区域的分布,亦即仅考虑电极间电势驻波效应,并假设电极表面曲率保持很小(准平面近似).如果等离子体出现,则假设电磁波趋肤深度足够大以至于趋肤效应忽略不计,忽略平行于电极平面的横向电场分量,而仅考虑垂直于电极平面的纵向电场分量.根据以上条件,由电磁波 Maxwell 方程组得出两金属平板电极间的电势差波动方程^[18]

$$\nabla_{\perp}^2 V - \frac{\nabla_{\perp} Z}{Z} \cdot \nabla_{\perp} V - YZV = -ZJ_z, \quad (1)$$

式中 ∇_{\perp} 是二维横向微分算符, V 是电极间电势差, J_z 是馈入点电流密度, Z 是电极单位面积上的串联阻抗, Y 是电极间单位面积介质的并联导纳.

由波动方程(1)可以看出,二维准平面电路模型通过并联导纳 Y 和串联阻抗 Z 两参数可以考虑等离子体存在和电极间距存在小变化时的电极间电势差分布情况.串联阻抗 Z 和并联导纳 Y 可分别表示为

$$Z = j\mu_0 \omega d, \quad (2)$$

$$Y = \frac{j\epsilon_0 \omega}{\int_0^d \frac{1}{\epsilon} dz}, \quad (3)$$

式中 d 是电极间距, ω 是激发角频率, ϵ_0 是真空介电常量, μ_0 是真空磁导率, ϵ 是电极间介质的相对介电常量.

这里仅讨论电极间距不存在变化的理想平行板电极间的真空电势差分布.因此,对于给定的激发角频率 ω 和电极间距 d ,电极单位面积上的串联阻抗 Z 为一常数,而真空条件下电极间的相对介电常量 $\epsilon = 1$,电极间单位面积介质的并联导纳 Y 由(3)式得

$$Y = \frac{j\epsilon_0 \omega}{d}. \quad (4)$$

本文讨论如图 1(a)所示的大面积平行板电极

PECVD 反应室模型,功率电极采用顶部中心单点馈入方式, d_t 为顶部电极间距, d_b 为底部电极间距.在这种电极结构的 PECVD 反应室中,根据电极间的电势差波动方程(1)分别写出顶部电极间的真空电势差 V_t 和底部电极间的真空电势差 V_b 的波动方程

$$\nabla_{\perp}^2 V_t + k_0^2 V_t = \delta(x, y), \quad (5)$$

$$\nabla_{\perp}^2 V_b + k_0^2 V_b = 0, \quad (6)$$

式中 $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$ 为电磁波在真空中的波数,其中 f 为电源激发频率, c 为光速; $\delta(x, y)$ 为功率馈入点源项,在馈入点区域 $\delta(x, y) = 1$,其他区域 $\delta(x, y) = 0$.

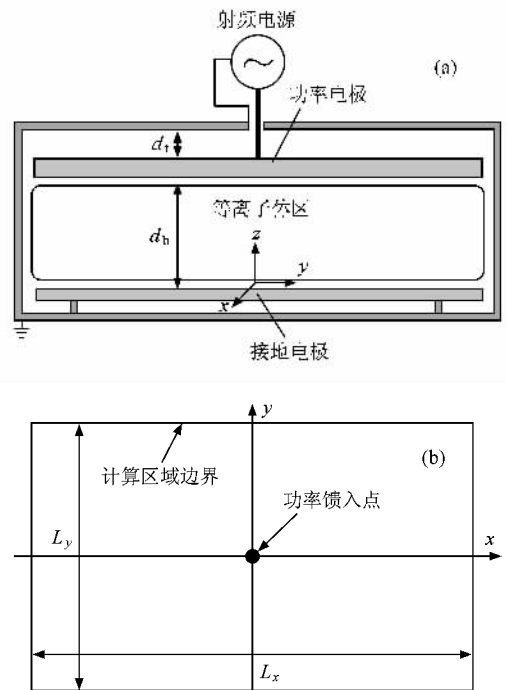


图 1 大面积平行板电极 PECVD 反应室电极间的电势差分布计算模型 (a)大面积平行板电极 PECVD 反应室结构截面示意图,(b)电极间电势差分布的等效二维计算区域

二维准平面电路模型已将三维电磁场沿 z 方向(电极间距方向)上进行了积分.因此,方程(5)和(6)只需在如图 1(b)所示的二维平面内进行求解, L_x 和 L_y 分别为电极的长和宽(忽略电极板厚度),计算区域边界等效于功率电极的边界.考虑到在电极边缘处电势连续和电流连续,方程(5)和(6)在计算区域边界处满足下列边界条件:

$$V_b = V_t, \quad (7)$$

$$\frac{1}{d_t} \frac{\partial V_t}{\partial n} = -\frac{1}{d_b} \frac{\partial V_b}{\partial n}, \quad (8)$$

式中 n 为计算区域边界向外的单位法向矢量。

至此,针对我们研究的如图 1(a)所示的反应室模型,完成了电极间的电势差波动方程及边界条件的构建。这样反应室电极间的电势差分布由方程(5)和(6)及边界条件(7)(8)式决定。另外,图 1 中仅考虑的是中心单点功率馈入方式,实际上,在大面积矩形反应室中,通常可能采用多点功率馈入方式。对于多点馈入方式,电极间的电势差波动方程(5)和(6)及边界条件(7)(8)式完全相同,仅在于功率馈入点源项 $\delta(x, y)$ 在计算区域内的分布位置不同。

本文使用偏微分方程计算软件 FlexPDE 对方程(5)和(6)求解。计算中需要输入的参量有电源激发频率 f , 电极长度 L_x 和宽度 L_y , 以及顶部电极间距 d_t 和底部电极间距 d_b 。本文计算中固定 $d_t = 0.6$ cm 和 $d_b = 2.5$ cm。计算中,考虑到实际等离子体产生仅在底部电极间区域,所以我们仅讨论底部电极间的电势差分布情况。同时,为了便于进行均匀性比较,我们对底部电极间电势差 V_b 分布做极大值归一化处理,并应用文献[4]中公式 $\pm \Delta V = (V_{\max} - V_{\min}) / (V_{\max} + V_{\min})$ 计算电极间电势差 V_b 分布的非均匀性,其

中 V_{\max} 和 V_{\min} 分别为电极间电势差 V_b 的极大值和极小值。

3. 计算结果及讨论

本文首先以正方形平行板电极为例,采用中心单点馈入方式,讨论在 60 MHz 激发频率下电极尺寸增大对电极间的电势差 V_b 分布均匀性的影响。我们计算了正方形电极边长分别为 $L_x = L_y = 0.3$ m, $L_x = L_y = 0.5$ m, $L_x = L_y = 0.8$ m 和 $L_x = L_y = 1.0$ m 的电势差分布。二维准平面电路模型计算结果如图 2 所示。由图 2 可以看出:随着电极尺寸的不断增大,电极间的电势差 V_b 分布的均匀性逐渐变差。当 $L_x = 0.3$ m 时,电势差 V_b 的非均匀性仅为 $\pm 0.6\%$ (图 2(a))。当 $L_x = 0.5$ m 时, V_b 的非均匀性在 $\pm 1.6\%$ 左右(图 2(b))。当 $L_x = 0.8$ m 时, V_b 的非均匀性在 $\pm 4\%$ 左右(图 2(c))。而当 $L_x = 1.0$ m 时,电极间电势差 V_b 的非均匀性已超过 $\pm 7\%$ (图 2(d)), 这时电势驻波效应已显著增强。由以上计算可知,当

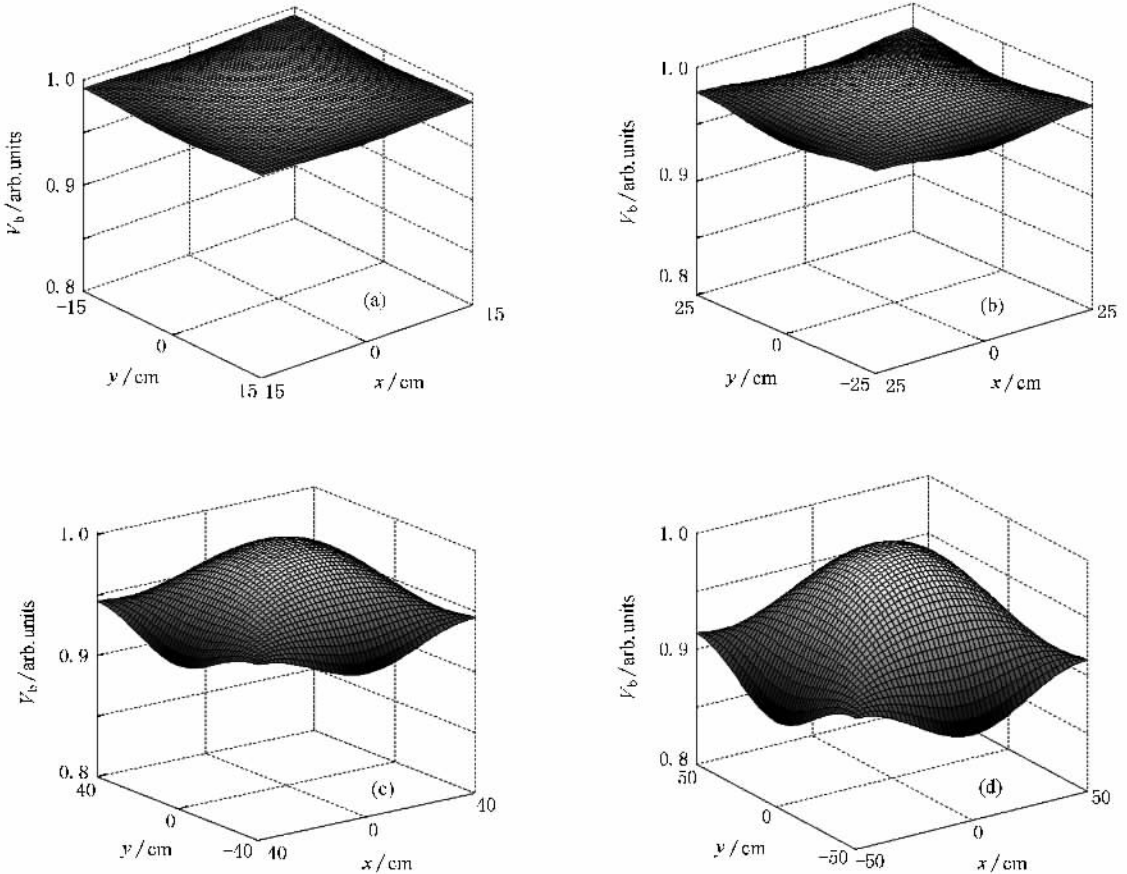


图 2 不同尺寸平行板电极间的电势差 V_b 分布 (a) $L_x = L_y = 0.3$ m, (b) $L_x = L_y = 0.5$ m, (c) $L_x = L_y = 0.8$ m, (d) $L_x = L_y = 1.0$ m

反应室电极边长接近或超过 60 MHz 电源所激发的电磁波的四分之一波长($\lambda/4 = 1.25 \text{ m}$)时,我们必须考虑由电势驻波效应所引起的电极间电势差的非均匀分布.

另外,我们知道电源激发频率 f 是影响 PECVD 反应室电极间的电势差分布均匀性最重要的参数之一,下面在给定平行板电极尺寸条件下讨论不同激发频率对电极间的电势差分布均匀性的影响.

考虑实际大面积 VHF-PECVD 反应室,其电极形状一般为矩形结构,因此计算中设电极尺寸为 $L_x = 1.2 \text{ m}$ 和 $L_y = 0.8 \text{ m}$,采用中心单点馈入方式,激发频率 f 分别为 13.56, 27.12, 40.68 和 60 MHz,计算所得结果如图 3 所示.在 13.56 MHz 激发频率下电极间的电势差 V_b 分布非常均匀,电磁场的波动性没有体现出来.当频率为 27.12 MHz 时,电极间电势差 V_b 分布的非均匀性约为 $\pm 1.7\%$,如图 3(b)所示.当频率提高到 40.68 MHz 时,电势差 V_b 分布的非均匀性在 $\pm 4\%$ 左右,如图 3(c)所示.而当频率进

一步提高到 60 MHz 时,电势差 V_b 分布的非均匀性已达到 $\pm 8.5\%$,如图 3(d)所示,这时电极间电势驻波效应已经十分显著.

以上计算结果表明,对于设定尺寸的大面积平行板电极,随着激发频率的提高,电极间电势差分布的均匀性逐渐变差,电极间电势驻波效应逐渐增强.特别是在 60 MHz 激发频率下,电势驻波效应更加突出.

根据文献 [4] 报道,射频功率馈入点数量和位置对大面积平行板电极间的电势差分布有重要影响.本文在尺寸为 $L_x = 1.2 \text{ m}$ 和 $L_y = 0.8 \text{ m}$ 的电极上,采用四点等功率同相位馈入方式,分别应用 40.68 和 60 MHz 两种激发频率,经过四点位置优化计算得到如图 4 所示的电极间电势差分布.由图 4 与图 3 比较后可以发现,在相同激发频率下,图 4 的电极间电势差分布均匀性相对于图 3(c)(d)所示的中心单点馈入方式的电势差分布均匀性得到了较大改善.对于 40.68 MHz 激发频率,电极间电势差分布非均

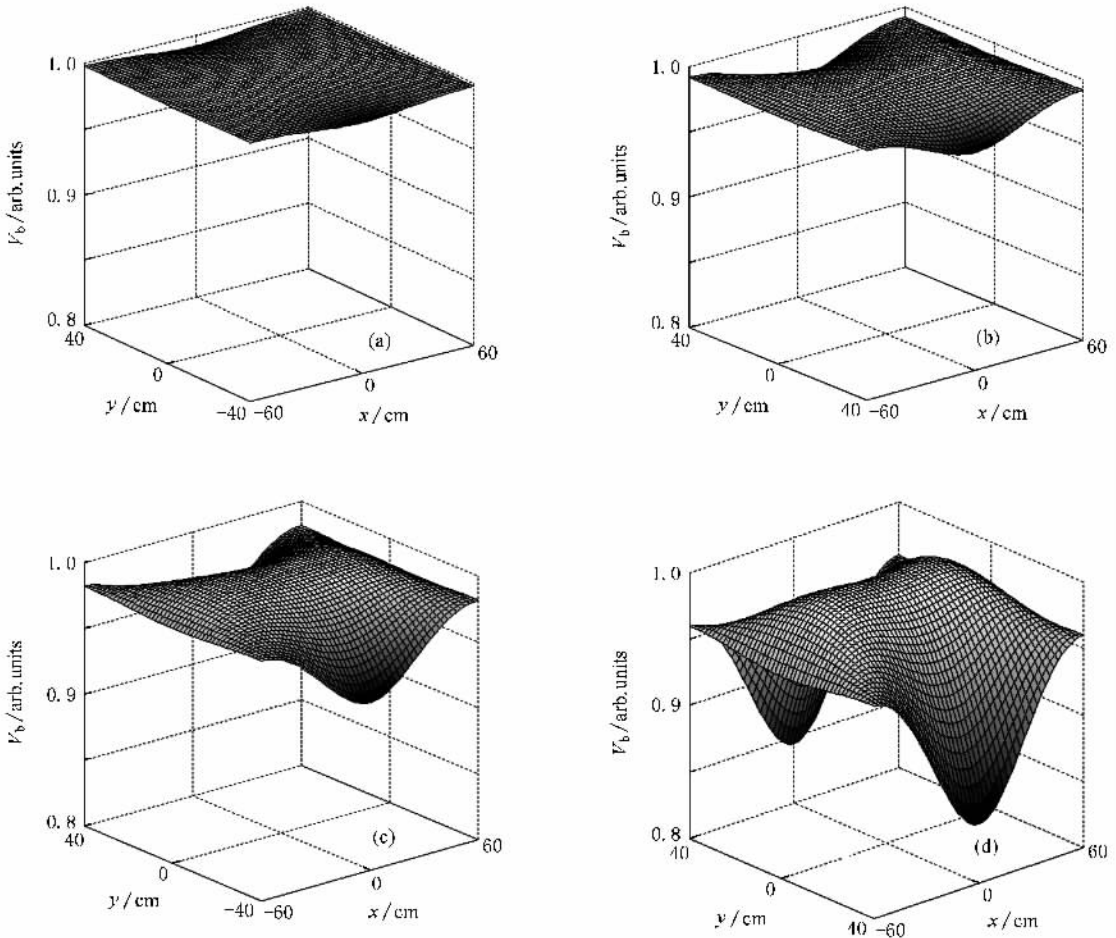


图 3 不同激发频率电极间的电势差 V_b 分布 (a)13.56 MHz (b)27.12 MHz (c)40.68 MHz (d)60 MHz

匀性由中心单点馈入方式的 $\pm 4\%$ 降低到 $\pm 2.5\%$ 之内,对于 60 MHz 激发频率,电极间的电势差分布非均匀性由中心单点馈入方式的 $\pm 8.5\%$ 降低到

$\pm 5.5\%$ 之内。

通过以上计算结果可知,功率馈入点数量和位置对电极间电势差分布均匀性产生明显的影响。在给定电极尺寸和激发频率的条件下,通过优化功率馈入点的数量和位置可以使电极间的电势差分布均匀性得到较大改善。

4. 结 论

VHF-PECVD 大面积薄膜沉积技术在工业生产领域有着广阔的应用前景。目前 VHF-PECVD 技术在制备大面积薄膜材料主要存在的问题是薄膜厚度和性能的不均匀性,而电极间电场的非均匀分布正是造成薄膜材料不均匀的主要原因之一。本文针对这一问题应用二维准平面电路模型考察了造成电场非均匀分布的原因之一,即电极间电势驻波效应。计算结果表明,当 VHF 技术应用于大面积平行板电极 PECVD 反应室,若电极尺度与 VHF 电源所激发的电磁波的四分之一波长接近时,电极间电势驻波效应将造成大面积平行板电极间电场分布明显的不均匀,这成为影响大面积薄膜均匀沉积的一个重要因素。计算结果同时也表明,功率馈入点数量和位置是影响电极间电场分布均匀性的重要参量,可以通过馈入点数量和位置的优化来改善电极间电场分布的均匀性。本文的数值计算结果为大面积平行板电极在 VHF-PECVD 反应室中应用提供了重要的理论指导。

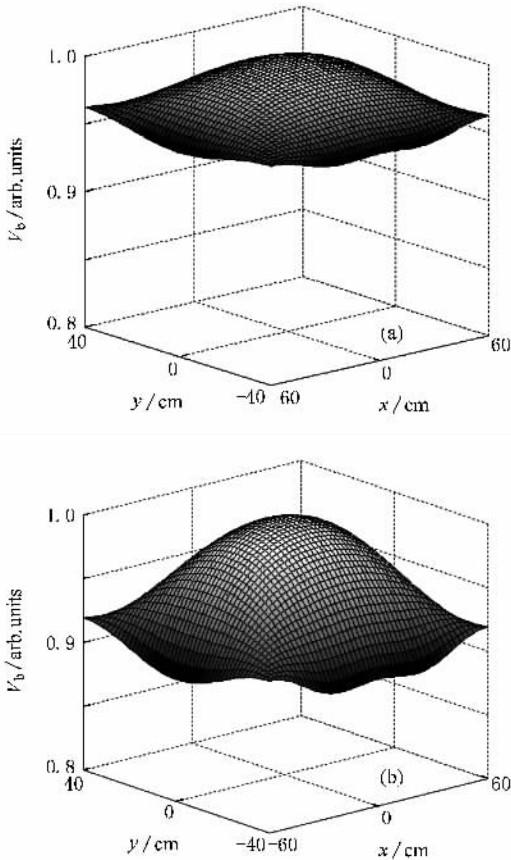


图4 四点位置优化馈入方式电极间的电势差 V_b 分布
(a) 40.68 MHz (b) 60 MHz

- [1] Schmitt J , Elyaakoubi M , Sansonnens L 2002 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **11** A206
- [2] Howling A A , Dorier J , Hollenstein C , Kroll C , Finger F 1992 *J. Vac. Sci. Technol. A* **10** 1080
- [3] Curtins H , Wyrsh N , Favre M , Shah A 1987 *Plasma Chem. Plasma Proces.* **7** 267
- [4] Sansonnens L , Pletzer A , Magni D , Howling A A , Schmitt J 1997 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **6** 170
- [5] Zhang X D , Zhao Y , Gao Y T , Zhu F , Wei C C , Sun J , Geng X H , Xiong S Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4874 (in Chinese) [张晓丹、赵颖、高艳涛、朱锋、魏长春、孙建、耿新华、熊绍珍 2005 物理学报 **54** 4874]
- [6] Gao Y T , Zhang X D , Zhao Y , Sun J , Zhu F , Wei C C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1497 (in Chinese) [高艳涛、张晓丹、赵颖、孙建、朱锋、魏长春 2006 物理学报 **55** 1497]
- [7] Sansonnens L , Schmitt J 2003 *J. Appl. Phys. Lett.* **82** 182
- [8] Sansonnens L , Strahm B , Derendinger L , Howling A A , Hollenstein C 2005 *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** 922
- [9] Howling A A , Sansonnens L , Ballutaud J , Hollenstein C 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5429
- [10] Howling A A , Derendinger L , Sansonnens L , Schmidt H , Hollenstein C 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 123308
- [11] Liberman M A , Booth J P , Chaber P , Rax J M , Turner M M 2002 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **11** 283
- [12] Sansonnens L , Howling A A , Hollenstein C 2006 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **15** 302
- [13] Chabert P , Raimbault J , Rax J M , Perret A 2004 *Phys. Plasmas* **11** 4081
- [14] Kawamura K , Mashima H , Takeuchi K , Takano A , Noda M , Yonekura Y , Takatsuka H 2006 *Thin Solid Films* **506** 22
- [15] Mashima H , Yamakoshi H , Kawamura K , Takeuchi Y 2006 *Thin Solid Films* **506** 512

- [16] Takeuchi Y , Takano A , Mashima H , Kawamura K , Yamauchi Y , Takeatsuka H 2004 *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Paris : WIP Renewable Energies) p1378
- [17] Schmidt H , Sansonnens L , Howling A A , Hollenstein C , Elyaakoubi M , Schmitt J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 4559
- [18] Sansonnens L 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063304

Study of space voltage distribution between large-area parallel-plate electrodes for very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition *

Ge Hong^{1)†} Zhang Xiao-Dan¹⁾ Yue Qiang¹⁾ Zhao Jing²⁾ Zhao Ying¹⁾

¹ *Xi Institute of Photo-electronic Thin Film Devices and Technique , Key Laboratory of Photo-electronic Thin Film Devices and Technique of Tianjin , Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , Nankai University , Tianjin 300071 , China*

² *Tianjin Xinhua Staff and Workers University , Tianjin 300040 , China*

(Received 12 September 2007 ; revised manuscript received 6 March 2008)

Abstract

The two-dimensional quasi-planar circuit model is used to study the space voltage distribution between large-area parallel-plate electrodes of very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition(VHF-PECVD) reactor. The results show that the voltage standing wave effects become the important factor affecting non-uniform voltage distribution when the electrode dimensions and excitation frequency are increased. For a large-area parallel-plate electrode with 1.2 m by 0.8 m lateral dimension , driven respectively at frequencies of 40.68 and 60 MHz , the space voltage non-uniformity about $\pm 2.5\%$ and $\pm 5.5\%$ are obtained by optimization of the number and position of the power feeding points. These results provide important theoretical guidance for large-area parallel-plate electrodes used for VHF-PECVD.

Keywords : two-dimensional quasi-planar circuit model , very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition , voltage standing wave effects

PACC : 5235H , 5240D

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant Nos. 2006CB202602 , 2006CB202603) , the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60506003) , the Key Program of the International Cooperation of Ministry of Science and Technology , China (Grant No. 2006DFA62390) and the National High Technology Development Program of China(Grant No. 2007AA05Z436) .

† E-mail : gehong@mail.nankai.edu.cn