

大面积表面波等离子体的特性研究

刘明海¹⁾ 菅井秀郎²⁾ 胡希伟¹⁾ 石岛芳夫²⁾ 江中和¹⁾ 李 斌¹⁾ 但 敏¹⁾

1) 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

2) 名古屋大学工学部电气研究科, 名古屋 4648603)

(2005 年 9 月 12 日收到, 2005 年 12 月 18 日收到修改稿)

介绍一种矩形反应腔体结构的表面波等离子体源, 通过对垫层介质及天线结构的优化设计, 产生了大面积均匀的等离子体. 采用静电探针测量了等离子体参数(密度、电子温度)在不同运行条件(气压、功率)下的空间分布; 采用扩散模型, 数值模拟了等离子体密度在垂直方向上的空间分布, 并较好地解释了实验测量结果.

关键词: 表面波等离子体, 狭缝天线, 数值模拟, 探针测量

PACC: 5250, 5240F, 5275R

1. 引言

随着半导体晶片超微细加工、液晶显示器、太阳能电池、生物医学高分子薄膜及高聚物的表面改性等领域的迅速发展, 近年来迫切需要发展大面积均匀、低气压高密度、大口径(尺度达 100cm)的新型等离子体源. 与其他类型的等离子体源相比, 表面波等离子体具有许多无可比拟的优点: 无需 ECR 等离子体或螺旋波等离子体那样的磁场, 结构简单, 不存在平板型等离子体那样因电极插入而导致的杂质污染问题, 便于产生截止密度以上的高密度等离子体; 用小尺度的开口天线, 就可以通过表面的传播实现等离子体的大口径化, 已经成为下一代超大规模集成电路器件加工的强有力竞争者. 正因如此, 法国、德国、日本等在上世纪 90 年代末期相继开展了这方面的研究工作^[1, 2]. 本世纪初, 中国科大、中科院等离子体所及复旦大学也做出了很好的工作^[3-5]. 目前国内所报道的腔体结构都是圆柱体, 本文采用矩形腔体结构^[6, 7], 狭缝天线可以沿反应室的纵向排成阵列结构, 这样天线的数量和结构布局均有很大的选择余地. 通过对狭缝天线的优化设计, 便可产生大面积均匀的高密度等离子体. 考虑到工业实际应用, 采用长方体结构可以满足不同领域的需要, 因为不但长度可以改变, 而且宽度也可以加宽. 对于大口径的工业应用, 只要微波传输功率足够高, 用功分器分成几路, 将长方体宽边对接便可实现大体积(尺度达 1m)等离子体源. 本文的研究目的是通过优化设计开槽

天线的阵列结构及垫层介质, 来探寻产生大面积均匀的高密度等离子体的技术手段和实施途径.

2. 大面积表面波等离子体的产生

在表面波等离子体中, 微波是通过狭缝天线耦合进入真空室内的, 在狭缝的正下方首先击穿气体放电, 形成高密度等离子体. 当微波功率高时, 电磁波传输到临界密度层要被反射回来, 沿介质板和等离子体界面往四周传播, 其能量被约束在界面附近的区域内, 并随传播距离指数衰减. 如果入射功率足够大, 电磁波沿界面传输到真空室壁处的强度还足够强, 即可产生大面积均匀的高密度等离子体. 到目前为止, 反应器尺度达 1m 的等离子体装置是电容耦合型(CCP), 由于产生的等离子体密度不够高, 因此其产额也就低. 在表面波等离子体装置中, 微波(2.45GHz)通过波导(宽度为 106mm)内的狭缝天线耦合进入反应腔室, 其尺度为 100cm × 30cm × 30cm, 目前只在一维方向的尺度达到 1m, 今后希望能够在二维方向均达到 1 米的尺度. 在贴近天线的腔室表面设有一层垫层介质, 减少了电磁波在天线等离子体之间的界面反射, 对均匀等离子体的产生起着至关重要的作用. 由于尺度达到了 1m, 如何在这么大的范围内产生均匀的等离子体, 其关键就在于天线阵列结构的优化设计, 以便保证微波在天线内尽可能等功率地耦合进入等离子体. 本文根据天线设计原理进行了很多尝试, 典型的天线阵列结构示意图如图 1 所示.

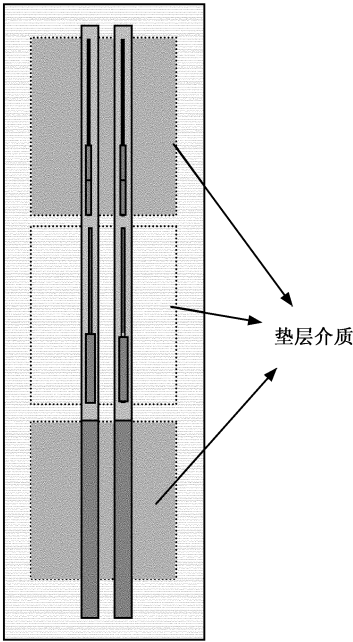


图 1 天线阵列结构示意图

3. 实验测量

为了了解表面波等离子体的参数特性,采用静电探针测量了等离子体密度及电子温度在不同运行条件(气压,功率)下的空间分布.图 2 为等离子体密度随压强的变化,可以看出,在低气压时,等离子体密度随气压的上升而增加;在高气压时,等离子体密度随气压的增加而减小,即等离子体密度随压强的增加要出现饱和现象.图 3 为电子温度随距离的变化,可见电子温度随距离的增加要逐渐减小,这是因为中性气体的密度随距离的增加而增加,频繁的碰撞使电子失去能量;图 4 等离子体密度随距离的变化,由于表面波能量被约束在界面附近的区域内,因此等离子体密度随距离的增加而减小.

4. 数值模拟

为了更好地理解实验测量结果,我们对天线阵平面的法向方向的等离子体密度进行了数值模拟.由于电磁波在等离子体的传播距离非常有限,也就是说,等离子体密度在接近天线附近有极大值,之后随距离的增加而减小,因此可以采取扩散模型来描述.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = \xi n, \quad (1)$$

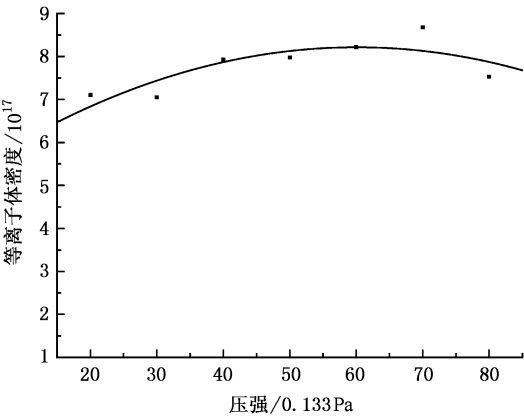


图 2 等离子体密度随压强的变化

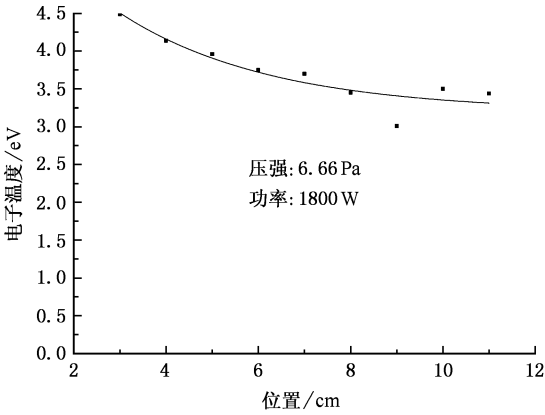


图 3 电子温度随距离的变化

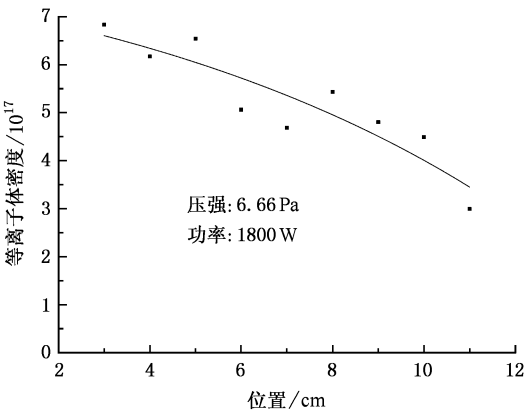


图 4 等离子体密度随距离的变化

$$m \frac{\partial (n\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + nq\mathbf{E} - nm\mathbf{v} \quad (2)$$

其中 n 是等离子体密度, p 是压强, ξ 是电离速率.

如果电子温度是均匀的,则

$$\nabla p = kT\nabla n.$$

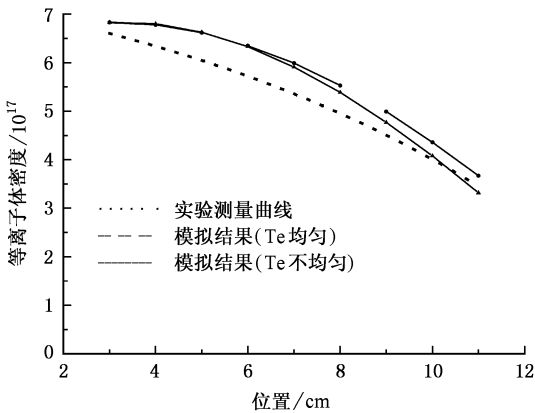


图 5 模拟结果与实验测量的比较

双极扩散通量

$$\Gamma_e = \Gamma_i = n\mathbf{v} = -D_a \nabla n,$$

其中 D_a 是双极扩散系数。

稳态时(忽略二阶效应)得到

$$\frac{\nabla^2 n}{n} = -\Lambda^2, \Lambda^2 = \frac{\xi}{D_a}. \tag{3}$$

如果电子温度不是均匀的,一般假定 $T_i = T_e/10$,类似双极扩散通量

$$\Gamma_e = \Gamma_i = n\mathbf{v} = -D_p \nabla p,$$

其中 $D_p = \frac{1.1\mu_e\mu_i}{e(\mu_e + \mu_i)}, \mu_e, \mu_i$ 分别为电子与离子的迁移率,则有

$$\frac{\nabla^2 p}{p} = -\Lambda^2, \Lambda^2 = \frac{\xi}{D_p k T_e}. \tag{4}$$

归一化 $p \rightarrow p/n_0 k T_0$, 得到 $\nabla^2 p = -\Lambda^2 p$ 其中 n_0, T_0 为等离子体达到最大值时所对应的密度值及电子温度。

采用龙格-库塔法对方程(3)或(4)进行数值求解,图 5 是模拟结果与实验测量的比较,其中数值模拟用到的电子温度是采用前面实验测量的实际值,可见两者在定性上符合得很好,而且由于电子温度的差别很小,电子温度的不均匀效应所作的修正很小。

5. 结 论

本文介绍了一种矩形反应腔体结构的表面波等离子体源,通过设计不同的天线结构及垫层介质产生了大面积均匀的等离子体;采用静电探针测量了等离子体参数(密度、电子温度)在不同运行条件(气压、功率)下的空间分布;采用扩散模型,数值模拟了等离子体密度在垂直方向上的空间分布,并比较好地解释了实验测量结果。

[1] Kozzec D , Werner F , Brckhaus A 1995 *J. Vac. Sci. Technol.* **13** 2074

[2] Sugai H , Ghanashev I , Nagatsu M 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* **2** 192

[3] Ou Q R ,Liang R Q 2002 *Vacuum and Low temperature* **8** 28 (in Chinese)[欧琼荣、梁荣庆 2002 真空与低温 **8** 28]

[4] Zhan R J , Wu C F , Wen X H , Zhu X D , Zhou H Y 2001 *Vacuum Science and Technology* **21** 30 (in Chinese)[詹如娟、吴丛凤、温晓辉、朱晓东、周海洋 2001 真空科学与技术 **21** 30]

[5] Liang R Q , Ou Q R , Fang F , Liang B , Wang F , Han D 2005 *The 12th conference of plasma science and technology , shanghai* p24 (in Chinese)[梁荣庆、欧琼荣、房 芳、梁 波、王 飞、韩 冬 2005 第十二届全国等离子体科学技术会议 ,上海 ,第 24 页]

[6] Liu M H , Ishijima T , Sugai H 2004 *Production of Large-area Microwave Plasma For Material Processing , International symposium on novel materials processing by advanced electromagnetic energy sources , Osaka , Mar. 2004* p123

[7] Liu M H , Hu X W , Jiang Z H , Ishijima T , Sugai H 2005 *The 12th conference of plasma science and technology , shanghai* p40 (in Chinese)[刘明海、胡希伟、江中和、石岛芳夫、菅井秀郎 2005 第十二届全国等离子体科学技术会议 ,上海 ,第 40 页]



Properties of large-area surface wave plasma

Liu Ming-Hai¹⁾ Sugai H²⁾ Hu Xi-Wei¹⁾ Ishijima T²⁾ Jiang Zhong-He Li Bin¹⁾ Dan Min¹⁾

¹⁾ *Institute of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

²⁾ *Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Nagoya 4648603, Japan*

(Received 12 September 2005 ; revised manuscript received 18 December 2005)

Abstract

Property of rectangular structure surface wave plasma was reported. Large-area uniform and high density plasma was produced by the optimization of slot antenna and the shape of dielectric plates. Plasma density and electron temperature for different operation conditions were measured by a Langmuir probe. Profile of plasma density along the vertical direction was modeled by a diffusive model, and the simulation result can be used to interpret qualitatively the measurement value very well.

Keywords : surface wave plasmas, slot antenna, numerical simulation, probe measurement

PACC : 5250, 5240F, 5275R