

矩形压缩谐振腔内基底对电场影响的仿真模拟

刘 繁,李国伟,马志斌,汪建华

(武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北省等离子体化学与新材料重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:针对微波等离子体化学气相沉积金刚石过程中,矩形谐振腔中激发的等离子体稳定性和均匀性差的问题,提出通过用 Ansoft 软件对矩形压缩谐振腔进行模拟计算来优化设计谐振腔的方法.模拟中,假设除了微波输入端口以外,所有的边界都定义为理想电导体;微波能以平面波的形式,通过矩形波导被耦合到微波谐振腔内;再用高频结构仿真器联合求解满足模型条件的麦克斯韦方程组,得出谐振腔中的电场分布结果.分别模拟了基底深入谐振腔内高度为 1.5、2、2.5、3、4 mm 和基底半径为 11、13、15、17 mm 时,腔体内的电场分布.数值模拟结果表明,压缩谐振腔内的最大电场强度为 817 V/m 左右,较压缩之前的电场强度增高了近一倍,且基底深入谐振腔高度为 2 mm,基底半径为 13 mm 左右时,装置内电场强度较集中.

关键词:谐振腔;高频结构仿真器;基底尺寸;电场模拟

中图分类号:O411.3

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.01.011

0 引 言

微波等离子体化学气相沉积广泛用于功能薄膜、纳米材料的制备中^[1-2],微波等离子体谐振腔中电场对等离子体的激发与稳定运行有重要的影响^[3-4].谐振腔中,特别是基片附近的电场对沉积过程及材料结构的影响非常重要,有必要对微波谐振腔以及内部的电磁场分布进行研究,从而提高装置的稳定性.

本实验采用 Ansoft 仿真软件^[5]对谐振腔内的电场分布进行模拟计算,根据模拟结果对微波等离子体矩形单模谐振腔的结构进行优化设计.同时,归纳出不同基底尺寸情况下电场强度及分布的变化规律,以寻求基底高度及半径的最佳尺寸,从而设计稳定高效且能产生高均匀度微波等离子体的装置.

1 谐振腔设计与模型建立

本实验装置主要由微波源、波导、反应腔及附属系统和微波调谐系统组成.其中,微波反应器由矩形压缩谐振腔、石英管、短路活塞等部分组成.矩形波导内电磁场分布较规律,目前微波等离子体化学气相沉积矩形单模谐振腔大部分是直接采用的标准矩形波导结构.

在常压微波等离子体射流装置的研制过程

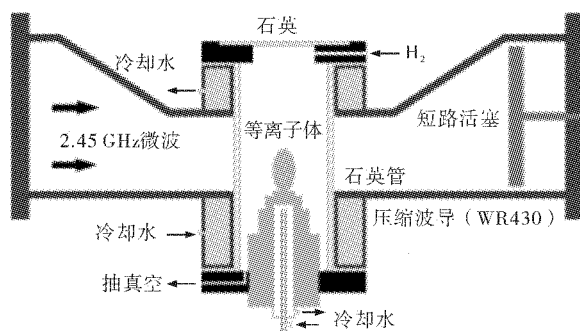


图 1 微波矩形压缩谐振腔等离子体装置结构示意图

Fig. 1 Schematic view of a microwave plasma device with compression rectangular cavity

中,为了更利于等离子体的激发,需要尽可能的增大耦合到谐振腔中的微波电场.可以从设计特殊结构的谐振腔这方面来进行考虑.对于谐振腔的结构,大多数装置都是采用结构单一的规则矩形波导,尽管这种类型的谐振腔有着加工简单、内部电磁场分布较简单的优点,但对谐振腔内的微波电场耦合却不能满足最大化的要求,因此,对谐振腔的结构进行优化设计能提高微波能量的利用率,更有利于微波等离子体的激发.通常采用的压缩谐振腔有阶梯型压缩谐振腔和渐变型压缩谐振腔两种结构,本实验中采用的是呈渐变型压缩这种方式.

波导的封闭特性决定了电磁波无法向外部空间进行辐射,而对矩形波导窄边进行压缩可以实

收稿日期:2012-12-11

基金项目:国家自然科学基金(10875093)资助项目

作者简介:刘 繁(1983-),女,湖北仙桃人,讲师,博士.研究方向:微波电磁场计算模拟.

现能量集中. 图 1 为实验室研制的矩形压缩谐振腔微波等离子体装置的结构示意图, 在矩形谐振腔电场最强的区域, 在宽边中心处插入一可上下调节的基底结构, 微波等离子体在基底上部被激发.

2 理论基础

采用标准 BJ26 的矩形波导, 波导管尺寸为 $86.4 \text{ mm} \times 43.2 \text{ mm}$, 波导内部传输模式为 TE₁₀ 模, 使用的微波频率为 2.45 GHz. 设计谐振腔部位为渐变型压缩结构, 对矩形波导谐振腔的窄边进行压缩. 谐振腔内部同样仅有 TE₁₀ 模式存在, 为一单模矩形谐振腔. 通过求解满足模型条件的麦克斯韦方程组, 即可得出其中的电磁场分布^[6].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot H = \rho \quad (4)$$

$$\int_l H \cdot dl = I_c + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \cdot ds \quad (5)$$

$$\int_l E \cdot dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds \quad (6)$$

$$\int_s B \cdot ds = 0 \quad (7)$$

$$\int_s D \cdot ds = q_0 \quad (8)$$

3 仿真分析

利用高频电磁场有限元软件高频结构仿真器 (HFSS) 模拟矩形压缩谐振腔的内部电磁场以及不同基底尺寸下基底附近的电场强度及分布. 在模拟时, 假设波导为理想导体, 并且微波能以平面波的形式通过波导传送到反应腔内进行耦合.

3.1 矩形压缩谐振腔内电场模拟

图 2 为矩形压缩谐振腔内微波传输方向的驻波数, 其中选取的剖面与矩形波导中波的传输方向平行并经过矩形波导宽边中线. 模拟可得, 在微波等离子体装置中, 如图 2 所示, 矩形压缩谐振腔内有一个半驻波分布, 并且最大电场强度为 817 V/m 左右, 而在图中最左端的半驻波分布可以看到, 结构无变化的矩形波导中的最大电场强度约为 462 V/m. 其中在矩形压缩谐振腔处的电场强度要比未经压缩的矩形谐振腔内的电场强度高出一倍大小, 等离子体的激发效率将会大大提高. 但是在实际操作中会存在一些不可避免的能量损耗, 因此实际需要的微波功率要大于计算值.

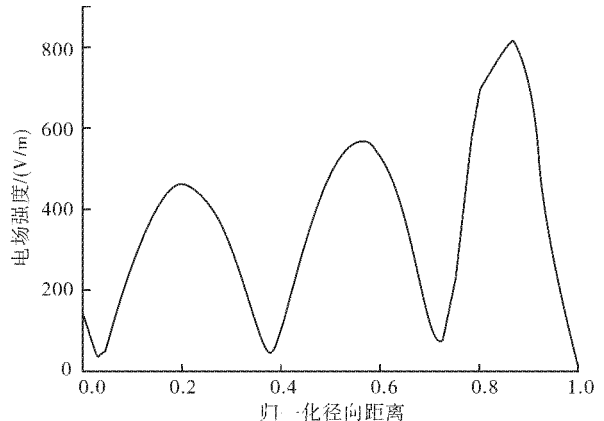


图 2 微波传输方向上分布的半驻波数

Fig. 2 The semi-standing wave on the microwave transmission direction

3.2 基底尺寸的设计

当谐振腔的结构固定时, 基底尺寸以及基底在矩形谐振腔内的位置对是否能激发稳定均匀的等离子体起着至关重要的作用. 用 Ansoft 软件对不同基底尺寸下矩形压缩谐振腔的内部电磁场分布进行计算模拟, 在此基础上对基底尺寸与电磁场的强度及分布规律进行归纳, 得到激发微波等离子体最佳条件下的基底尺寸.

图 3 为矩形压缩谐振腔内的电场强度随基底高度变化的曲线图. 横轴为归一化的径向距离并且所选取的平面位于基片台上方 5 mm 处, 从图中可以看出, 标有正方体, 三角符, 竖线, 圆, 星号的实线分别表示基底深入矩形压缩谐振腔内的高度为 1.5, 2, 2.5, 3, 4 mm. 由图可以得出, 当基底深入矩形压缩谐振腔内的高度为 2 mm 时, 电场强度相对较高. 根据计算模拟, 明显可以得知, 基底深入矩形压缩谐振腔过长或过短都不利于微波等离子体的激发.

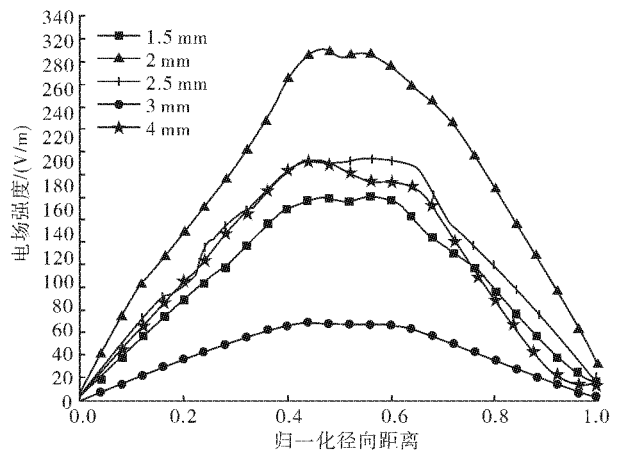


图 3 基底深入谐振腔不同高度与电场强度分布的关系图

Fig. 3 Distribution of electric field strength with different height of substrate

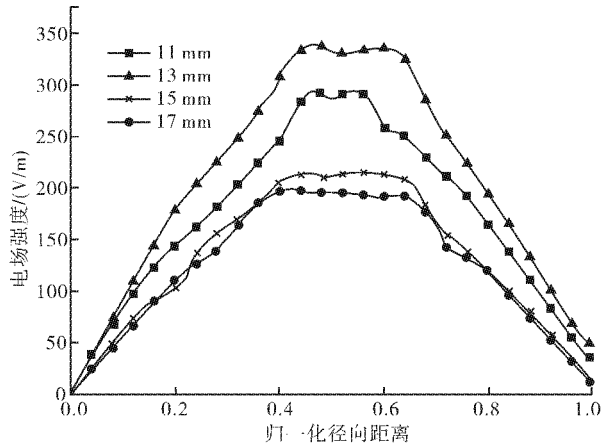


图 4 不同基底半径与电场强度分布的关系图

Fig. 4 Distribution of electric field strength in different radii of substrate

图 4 为矩形压缩谐振腔内的电场强度随基底半径变化的曲线图. 横轴为归一化的径向距离并且所选取的平面位于基片台上方 5 mm 处,从图中可以看出,标有正方形,三角符,叉线,圆的实线分别表示谐振腔内的基底半径为 11, 13, 15, 17 mm. 由图可以得出,当谐振腔内的基底半径为 13 mm 时,电场强度相对较高.

3.3 谐振腔内电场模拟

图 5 为微波频率为 2.45 GHz 时,矩形压缩谐振腔内的电场分布图,通过颜色的对比可以得出谐振腔内不同位置的电场分布,由此可以看出,矩形压缩谐振腔处的电场强度相对最强.

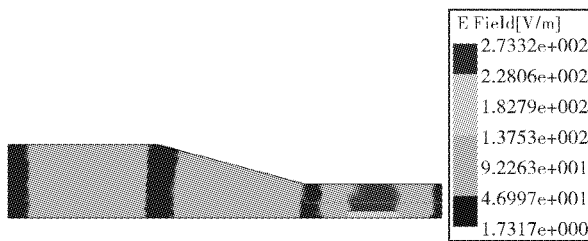


图 5 矩形压缩谐振腔内的电场分布图

Fig. 5 The electric field distribution in the compression rectangular cavity

4 结 语

本文利用高频结构仿真器软件(HFSS)模拟了一个矩形压缩谐振腔的微波等离子体装置内的电场分布,并根据模拟结果讨论了矩形压缩谐振腔的结构和基底尺寸对电场的影响. 结果表明:在选用矩形压缩谐振腔的情况下,基底尺寸的变化对谐振腔内的电磁场强度影响较大,且基底深入谐振腔 2 mm 左右,基底半径为 13 mm 左右时,更有利于均匀等离子体的激发,这为微波等离子体炬的数字化设计打下了基础.

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会提供的资金资助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Wu Z Y, Xu Y Y, Zhang X L, et al Microwave plasma treated carbon nanotubes and their electrochemical bio-sensing application[J]. Talanta 2007,72:1336-1341.
- [2] Koidl P, Klages C P. Optical application of polycrystalline diamond[J]. Diamond and Related Materials. 1992(1):1065-1074.
- [3] Zuo S S, Yaran M K, Grotjohn T A. Investigation of diamond deposition uniformity and quality for free standing film and substrate applications [J]. Diamond and Related Materials. 2008,17:300-305.
- [4] Tachibana T, Ando Y, Watanabe A. Diamond films grown by a 60-kW microwave plasma chemical vapor deposition system [J]. Diamond and Related Materials. 2001(10):1569-1572.
- [5] 谢拥军,王鹏. Ansoft HFSS 基础及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [6] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 北京:国防工业出版社,1984.

Simulation of substrate influence on electric field in compression rectangular cavity

LIU Fan , LI Guo-wei , MA Zhi-bin , WANG Jian-hua

(Province Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials, School of Materials
Science and Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The plasma used for microwave plasma chemical vapor deposition diamond in a rectangular resonant cavity has poor stability and uniformity. The Ansoft software is used to simulate the electric field in the rectangular compression resonant cavity and optimize the device. In the simulation, it assumed that all the boundaries were defined as ideal electric conductor in addition to the microwave input port; microwave with plane wave form was got through the rectangular waveguide and coupled to the microwave resonant cavity; The result of electric field distribution in resonant cavity was achieved through the Maxwell's equations solved by high frequency structure simulator which suited for the model. The electric field distribution in cavity was simulated in different parameters that the substrate radii were 11 mm, 13 mm, 15 mm, 17 mm and the depths of substrate inserted in the reaction cavity were 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 4 mm, respectively. Numerical simulation results show that electric field strength in the compression resonant cavity is about 817 V /m which is almost double compared with that in standard waveguide cavity. The electric field strength inside the cavity is concentrated when the substrate radius is 13 mm and the depth of substrate inserted in the reaction cavity is 2 mm.

Key words: resonant cavity; high frequency structure simulator; substrate size; electric field simulation

本文编辑: 龚晓宁