

# 双路微波耦合反应腔的等离子体发射光谱分析

李方辉, 何中文, 曹 为, 赵洪阳, 付秋明, 许传波, 马志斌\*

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 430205

**摘 要** 反应腔作为微波等离子体化学气相沉积法制备光纤预制棒的核心, 其结构直接影响到反应腔内的电磁场分布, 进而影响到等离子体状态, 因此对反应腔的结构进行研究是十分有必要的。为了在反应腔中获得较高密度和较好均匀性的等离子体, 提出了一种双路微波耦合反应腔结构, 首先模拟计算了不同反应腔结构参数下反应腔内的电场分布规律, 并以氧气作为工作气体, 通过等离子体发射光谱探究了反应腔结构和工作气压对石英管内的等离子体分布的影响。研究表明: 双路微波输入方式在石英管中心区域产生了很强的电场耦合增强效果。反应腔的内径对电场分布状态影响较大, 在反应腔内径为 86 mm 时, 石英管内的电场分布出现轴对称性, 且轴向中心区域的等离子体密度最大。在二路矩形波导的距离为 61.2 mm 和反应腔的长度为 202 mm 时, 反应腔内等离子体的强度和均匀性具有最佳分布。另外还发现, 当气压从 1.8 kPa 上升到 2.8 kPa 时, 反应腔内等离子体光谱强度减小, 但靠近石英管内壁处的变化不明显, 这与等离子体中粒子碰撞几率增加造成的能量损失和管壁存在的高温有关。

**关键词** 双路微波耦合反应腔; 发射光谱; 微波等离子体

**中图分类号:** O531 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3613-04

## 引 言

微波等离子体化学气相沉积法(microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD)制备光纤预制棒是利用超纯氧气作为载体将  $\text{SiCl}_4$ 、掺杂剂等原料送入到旋转的石英衬管内, 在微波等离子体中反应生成玻璃态  $\text{SiO}_2$ , 并沉积在衬管内壁, 最后通过熔缩工艺得到实心预制棒<sup>[1-3]</sup>。反应腔作为 MPCVD 装置的核心, 其结构直接影响到反应腔内的等离子体分布状态。目前, 四分之一波长同轴反应腔已被用于工业化生产, 但此类反应腔是通过狭缝将外部环形腔中的驻波能量耦合到内腔中<sup>[4]</sup>, 为了避免反应腔中出现高次模, 内腔及衬管的尺寸都会受到限制。另有研究设计出了一种单路微波耦合圆柱形反应腔<sup>[5]</sup>, 并进行了仿真模拟, 结果表明虽然衬管直径得到进一步增大, 但反应腔中的电场分布并非在中心完全对称, 只能以输入更高的微波功率为代价来保证沉积的均匀性。

为此, 本文提出了一种双路微波耦合反应腔结构, 同时结合仿真计算和等离子体发射光谱法对反应腔结构进行了优

化, 研究了不同结构参数下的电场分布规律, 进一步以氧气为工作气体, 对不同结构反应腔轴向上的等离子体发射光谱进行了测量分析, 研究了反应腔结构和气压对等离子体分布的影响。

## 1 反应腔结构及实验过程

自行设计的反应腔结构如图 1 所示, 两路频率为 2.45 GHz 的微波从圆柱形反应腔的侧面馈入, 矩形波导(86.4 mm×43.2 mm)的窄边与反应腔的轴向平行。外径为 50 mm 厚度为 2 mm 的石英管置于圆柱型反应腔内, 两路矩形波导的距离  $L$  和反应腔的长度  $H$  可调。反应腔侧壁上开设观测小孔, 小孔孔径 4 mm, 孔距 6 mm, 如图 1 所示。

仿真计算基于 Maxwell 方程组的微分形式, 结合初始条件和边界条件对反应腔模型求解。等离子体密度(电子密度)与模型内的电场强度  $E$  呈正比关系<sup>[6]</sup>。在实验中, 利用海洋光学公司生产的 Maya2000 Pro-NIR 光谱仪对氧等离子体谱线中强度较大的特征峰(777.4 nm)进行了测量, 积分时间设为 8 ms。

收稿日期: 2019-09-22, 修订日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11575134)资助

作者简介: 李方辉, 1995 年生, 武汉工程大学材料科学与工程学院硕士研究生 e-mail: fanghuiwryx@outlook.com

\* 通讯联系人 e-mail: mazb@wit.edu.cn

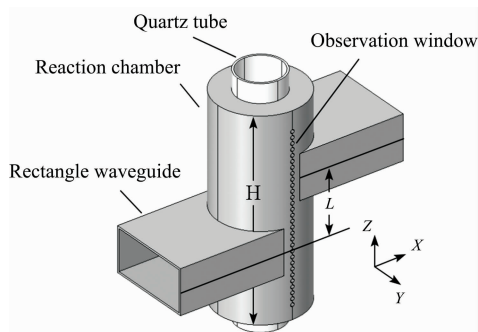


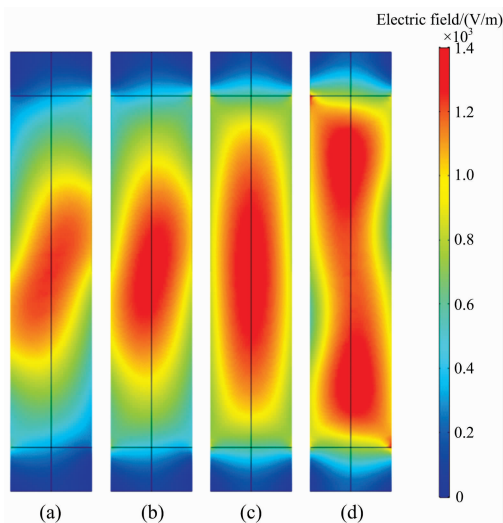
图 1 反应腔结构图

Fig. 1 Structure diagram of the reaction chamber

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应腔内径对电场分布的影响

在其他结构参数不变条件下,模拟了反应腔内径  $D$  分别为 80, 83, 86 和 89 mm 时所对映的石英管内的电场分布状态,结果如图 2(a,b,c,d)所示。从图 2 可以看出,在  $XZ$  平面上,不同反应腔内径所对映的电场分布都存在对称性,当反应腔内径从 80 mm 增加到 86 mm 时,两侧微波在石英管中心区域的耦合作用逐渐增强,轴向上强电场区域的长度也逐渐增加。

图 2 石英管内  $XZ$  平面上电场分布图

(a): 80 mm; (b): 83 mm; (c): 86 mm; (d): 89 mm

Fig. 2 Electric field distribution on the  $XZ$  plane in a quartz tube

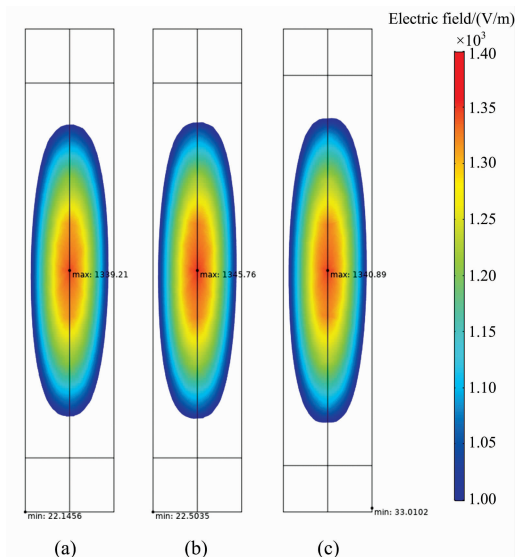
(a): 80 mm; (b): 83 mm; (c): 86 mm; (d): 89 mm

在  $D=86$  mm 时,电场分布实现良好的轴对称性,值得注意的是,此时的内径值接近矩形波导内传输微波波长值的二分之一,这种轴对称分布状态可能与两侧矩形波导内的  $TE_{10}$  波馈入到圆柱反应腔后,产生了很强的轴向电场分量 ( $E_z$ ) 有关<sup>[7]</sup>。而在  $D=89$  mm 时,虽然强电场区域的长度进一步增加,但石英管内电场强度最大处并非在中心位置,不利于保证沉积的均匀性,因此将反应腔内径  $D$  的最优值确定

为 86 mm。

### 2.2 反应腔的长度和两路矩形波导的距离对轴向电场及等离子体分布的影响

在反应腔内径  $D=86$  mm 条件下,研究了兩路矩形波导的距离  $L$  和反应腔的长度  $H$  对石英管内电场分布的影响,结果如图 3(a,b,c)所示。

图 3 石英管内  $YZ$  平面上电场分布图(a):  $L=53.2$  mm,  $H=194$  mm; (b):  $L=61.2$  mm,  $H=194$  mm;(c):  $L=61.2$  mm,  $H=202$  mmFig. 3 Electric field distribution on the  $YZ$  plane in a quartz tube(a):  $L=53.2$  mm,  $H=194$  mm; (b):  $L=61.2$  mm,  $H=194$  mm;(c):  $L=61.2$  mm,  $H=202$  mm

从图 3 中可以看出,  $YZ$  平面上的电场分布具有轴对称性,强电场区域出现在石英管的中间段,中心处 ( $Z=0$  mm) 的电场强度最大,增加反应腔长度和两路矩形波导的距离,可以使  $Z$  轴上强电场区域的长度略微增加,但中心位置的电场强度变化并不明显。

图 4 所示为理论计算和等离子体光谱实测结果。在兩路微波功率均为 900 W、氧气流量为 60 sccm 的条件下,对  $L=53.2, 61.2$  和  $67.2$  mm 时  $Z$  轴方向上的等离子体分布进行了测量,同时模拟计算出了  $L=61.2$  mm 时的电场等值面分布图,其中反应腔的长度  $H=L+140.8$  mm。从图 4(a)中可以看出,石英管内的电场分布存在旋转对称性,中心区域的电场强度最大。图 4(b)给出了兩路矩形波导的距离对  $Z$  轴等离子体发射光谱的影响,可以发现在  $L=53.2$  和  $61.2$  mm 时,石英管内都出现了一段均匀分布的高密度等离子体放电区域。当  $L$  从 53.2 mm 增加到 61.2 mm 时,等离子体均匀区的长度和各个位置处的光谱强度都增加,测量结果与图 3 模拟结果相符合。但是当  $L=67.2$  mm 时,曲线在两侧都出现凹陷段,均匀性变差。因此,在  $L=61.2$  mm 和  $H=202$  mm 时,反应腔内出现的高密度、大体积的等离子体分布状态最为理想。

### 2.3 气压对反应腔内等离子体分布的影响

在两路微波功率均为 900 W、氧气流量为 60 sccm、两路矩形波导的距离  $L=61.2$  mm 和反应腔的长度  $H=202$  mm 的条件下,研究了各方向上气压对反应腔内等离子体分布的影响,结果如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出,气压从 1.8 kPa 增加到 2.8 kPa, Z 轴上各个位置处的光谱强度都减小,同时等离子体均匀区的长度也逐渐减小,但对称性不变。在图 5(b)中,同一气压下中心处的光谱强度最小,气压升高导致径向(XY 轴)上的光谱强度都降低,但是越靠近石英管壁

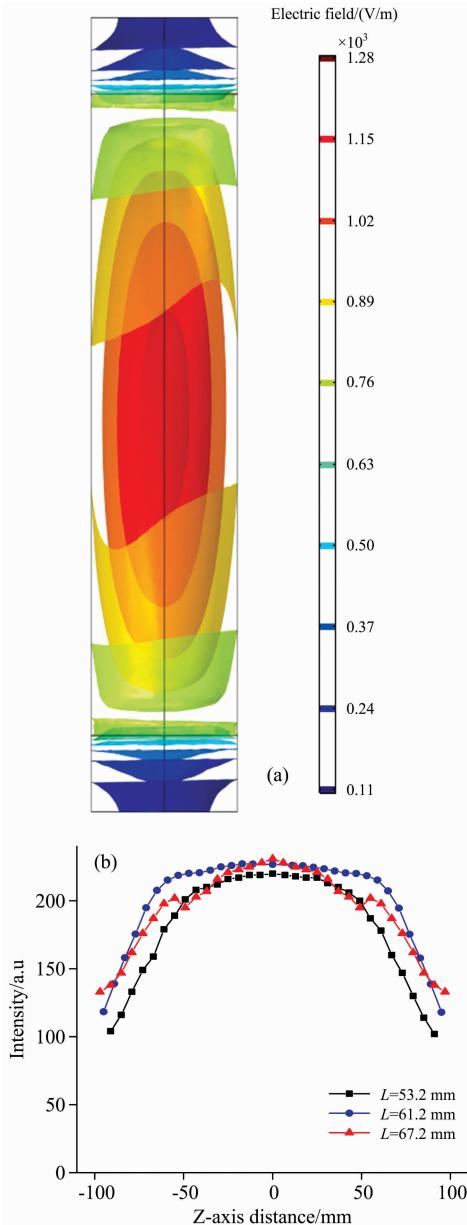


图 4 (a)  $L=61.2$  mm 时石英管内电场等值面模拟结果; (b) 两路矩形波导的距离对 Z 轴等离子体发射光谱的影响

Fig. 4 (a) Electric field isosurface simulation results in quartz tube at  $L=61.2$  mm; (b) Influence of the distance of waveguides on Z-Axis plasma emission spectroscopy

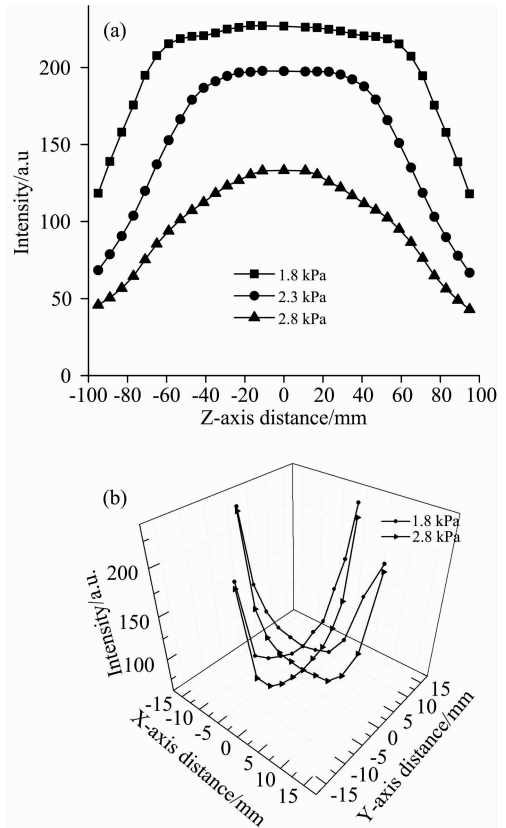


图 5 各方向上不同气压所对应的反应腔内等离子体发射光谱图

(a): 沿 Z 轴方向; (b): 沿 X 轴和 Y 轴方向

Fig. 5 Plasma emission spectra of the reaction chambers with different gas pressures

(a): Along the Z axis; (b): Along the X and Y axes

处光谱强度减小程度越不明显,并且沿 XY 方向上等离子体分布也具有对称性。

以上现象是因为气压增大提高了电子碰撞频率的同时,还增加了因碰撞引起的能量损失,导致等离子体密度降低,而等离子体密度降低还会增加气体的介电常数,反过来减小介质内的电场强度<sup>[8]</sup>,这种反馈效应进一步降低了等离子体密度和光谱强度。另外,沿石英管径向(X 轴和 Y 轴方向),低气压下等离子体通过热辐射及热传导效应会使管壁温度升高,并且高于气体温度,越贴近管壁的电子获得的动能越大,同时与其他粒子的碰撞频率增加,从而使管壁附近等离子体光谱强度高于中心处,而图 5(b)中气压对靠近管壁处的等离子体光谱强度影响较小,更说明管壁存在的高温是影响等离子体径向光谱强度的主要原因。

### 3 结论

通过模拟计算和等离子体发射光谱法研究了双路微波耦合反应腔中的等离子体分布规律。结果表明,采用双路微波输入方式,可在反应腔内获得很强的轴向电场耦合效果。石英管内的等离子体分布具有轴对称性。等离子体密度随气压

增加而减小,但分布规律不变。在反应腔内径为 86 mm、反 时,反应腔内获得了大体积、高密度的等离子体分布。应腔的长度为 202 mm 和两路矩形波导的距离为 61.2 mm

## References

- [ 1 ] Fasano A, Woyessa G, Stajanca P, et al. *Optical Materials Express*, 2016, 6(2): 649.
- [ 2 ] Grishchenko A B. *Quantum Electronics*, 2017, 47: 1115.
- [ 3 ] Gris-Sánchez I, Van Ras D, Birks T A. *Optica*, 2016, 3(3): 270.
- [ 4 ] Breuls A H E, Van Stralen M J N, Van Bergen A H. U. S. Patent 6, 849, 307, 2005.
- [ 5 ] Li Z Y, Li H S. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2012, 121: 642.
- [ 6 ] Yamada H, Chayahara A, Mokuno Y, et al. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15(9): 1395.
- [ 7 ] GU Ji-hui(顾继慧). *Microwave Technique(微波技术)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2008. 25.
- [ 8 ] Shivkumar G, Tholeti S S, Alrefae M A, et al. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(11): 113301.

# Plasma Emission Spectroscopy Analysis of Two-Way Microwave Coupled Reaction Cavity

LI Fang-hui, HE Zhong-wen, CAO Wei, ZHAO Hong-yang, FU Qiu-ming, XU Chuan-bo, MA Zhi-bin\*

School of Materials Science and Engineering, Key Laboratory of Plasma Chemical and Advanced Materials of Hubei Province, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract** The reaction chamber is used as the core of the optical fiber preform by microwave plasma chemical vapor deposition. The structure directly affects the electromagnetic field distribution in the reaction chamber, which affects the plasma state. Therefore, it is necessary to study the structure of the reaction chamber. In order to obtain plasma with higher density and better uniformity in the reaction chamber, a two-way microwave coupled reaction chamber structure was proposed. Firstly, the electric field distribution in the reaction chamber under different reaction chamber structural parameters was simulated and calculated. The effect of the reaction chamber structure and working pressure on the plasma distribution in the quartz tube was investigated by plasma emission spectroscopy using oxygen as the working gas. The results showed that the two-way microwave input method produces a strong electric field coupling enhancement effect in the central region of the quartz tube. The inner diameter of the reaction chamber had a great influence on the electric field distribution state. When the inner diameter of the reaction chamber was 86 mm, the electric field distribution in the quartz tube exhibits axis symmetry, and the plasma density in the axial center region was the largest. When the distance between the two rectangular waveguides was 61.2 mm, and the length of the reaction chamber was 202 mm, the intensity and uniformity of the plasma in the reaction chamber were optimally distributed. It was also found that when the pressure rises from 1.8 to 2.8 kPa, the spectral intensity of the plasma in the reaction chamber decreased, but the change near the inner wall of the quartz tube was not obvious, which was caused by the energy loss caused by the increase of particle collision probability in the plasma and the high temperature of the tube wall.

**Keywords** Two-way microwave coupled reaction cavity; Emission spectrum; Microwave plasma

(Received Sep. 22, 2019; accepted Feb. 8, 2020)

\* Corresponding author