

## 表面功能化

## 圆柱形谐振式 MPCVD 装置的模拟及调控

刘繁<sup>1</sup>, 翁俊<sup>1</sup>, 汪建华<sup>1,2</sup>, 周程<sup>1</sup>(1. 武汉工程大学 湖北省等离子体化学与新材料重点实验室, 武汉 430205;  
2. 中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** **目的** 在实验室自制的 5 kW 圆柱形单模微波等离子体化学气相沉积 (MPCVD) 装置上, 系统研究各放电参数对等离子体的影响。**方法** 采用模拟计算与实验调控相结合的方式, 分析微波等离子体、基团的运动和分布与放电参数之间的关系。利用发射光谱诊断等离子体环境, 同时, 利用 SEM 和 Raman 对所沉积的金刚石膜的形貌和质量进行表征, 以验证 MPCVD 装置的调控原则。**结果** 气压和温度满足  $T_g = \frac{8}{3}P$  关系时, 吸收功率密度可达最大。单独提高微波功率和工作气压, 能很大程度地增强等离子体的电子密度及改善等离子体球的均匀性, 而两者相互之间匹配升高能极大地增加等离子体的电子密度, 同时激发更多  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、CH 及  $C_2$  这类适合高质量金刚石膜沉积的活性基团。得到了 MPCVD 装置长时间稳定运行的等离子体稳定边界, 并成功制备出高质量的金剛石膜。**结论** 功率气压及温度相匹配可以提高吸收功率密度、等离子体密度及均匀性。在圆柱形装置稳定运行的边界条件下, 能沉积得到较高质量的金剛石膜。

**关键词:** 微波等离子体化学气相沉积; 等离子体; 金剛石膜

**中图分类号:** O539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)04-0184-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.04.017

## Simulation and Control of Cylindrical Resonant MPCVD Device

LIU Fan<sup>1</sup>, WENG Jun<sup>1</sup>, WANG Jian-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU Cheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials of Hubei Province, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to systematically study the effects of discharge parameters on plasma in a 5 kW cylindrical single-mode microwave plasma chemical vapor deposition device. The relationship between the motion and distribution of microwave plasma and the discharge parameters was analyzed by means of simulation and experimental control. The plasma environment was diagnosed by way of the emission spectrum. Meanwhile, the morphology and quality of the diamond film deposited were characterized by SEM and Raman, so as to verify the regulation principle of MPCVD device. The experimental results showed

收稿日期: 2020-04-30; 修订日期: 2020-08-04

Received: 2020-04-30; Revised: 2020-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51402220); 湖北省教育厅基金项目 (Q20151517)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51402220); Project of Hubei Provincial Department of Education (Q20151517)

作者简介: 刘繁 (1983—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为低温等离子技术与模拟。

Biography: LIU Fan (1983—), Female, Ph. D., Lecturer, Research focus: low temperature plasma technology and simulation.

通讯作者: 翁俊 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为低温等离子技术与金剛石膜材料。邮箱: 84312739@qq.com

Corresponding author: WENG Jun (1986—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: low temperature plasma technology and diamond film materials. E-mail: 84312739@qq.com

引文格式: 刘繁, 翁俊, 汪建华, 等. 圆柱形谐振式 MPCVD 装置的模拟及调控[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 184-190.

LIU Fan, WENG Jun, WANG Jian-hua, et al. Simulation and control of cylindrical resonant MPCVD device[J]. Surface technology, 2021, 50(4): 184-190.

that the absorption power density can reach the maximum when the pressure and temperature satisfied the relationship  $T_g = \frac{8}{3}P$ .

Increasing the microwave power and working pressure alone can greatly enhance the plasma electron density and improve the homogeneity of the plasma sphere, while increasing the matching between the two can stimulate more active groups such as  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ , CH and  $C_2$ , which are suitable for high-quality diamond film deposition. The plasma stable boundary of MPCVD device was obtained and the high quality diamond film was successfully prepared. The results of this paper provide a theoretical basis for plasma regulation in MPCVD devices.

**KEY WORDS:** microwave plasma chemical vapor deposition; plasma; diamond film

金刚石膜因其独一无二的物理化学性能,被广泛应用于电化学、半导体和航天航空等领域,而高质量的金金刚石膜更是广泛应用于军事领域<sup>[1-3]</sup>。在众多金金刚石膜的制备方法(如热丝化学气相沉积(HFCVD)法、高温高压(HTTP)法、直流等离子体喷射(DC-PACVD)法、电子回旋共振(ECR)法、微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)法等<sup>[4-8]</sup>)中,MPCVD法因其激发的微波等离子体电子密度高、无电极污染等优点,被认为是制备高质量金金刚石膜的首选方法。

随着 MPCVD 技术近 20 年的不断发展以及对高质量大面积金金刚石膜的迫切需求,高功率微波源的应用、MPCVD 装置的核心器件——微波等离子体谐振腔的设计和改进成为科研工作者研究的重点。如德国 Fünér 等设计的在 2.45 GHz (6.0 kW) 和 915 MHz (60 kW) 微波源下工作的椭球形谐振腔装置<sup>[9-10]</sup>;美国 Schuelke 的研究小组以及 ASTex 公司设计的 2.45 GHz (6.0 kW) 和 915 MHz (60 kW) 的圆柱形石英钟罩式 MPCVD 装置<sup>[11-12]</sup>;美国 Seki 公司开发的 AX6500 和 AX6600 系列大面积微波等离子体谐振腔装置<sup>[13-14]</sup>。这些研究工作都将研究重心放在提高微波功率和改进微波谐振腔的结构上。在我国,包括中科院合肥等离子体物理研究所、北京科技大学等在内的许多科研院所,针对微波谐振腔结构同样开展了大量的相关研究<sup>[15-17]</sup>。北京科技大学设计出一系列圆柱形多模 MPCVD 装置,并于 2019 年和河北激光研究所<sup>[18]</sup>在研制的 915 MHz/75 kW 高功率 MPCVD 装置上制备了直径为 127 mm 的大面积自支撑金金刚石膜。同时,笔者的研究小组也成功研发了一系列高功率多模 MPCVD 装置,并在该系统上进行了金金刚石膜可控性生长的实验研究。研究结果表明,提高微波功率和设计高品质因素的多模微波谐振腔,可以显著扩大所激发的微波等离子体的面积,改善微波等离子体的均匀性,从而有助于提升所沉积的金金刚石膜的质量及尺寸。但大面积微波等离子体的激发不仅依赖于微波功率的提高和微波谐振腔的改进,还与 MPCVD 装置的气压、功率、温度等放电参数之间的协调匹配息息相关。

本文在采用理论计算与多物理场模拟软件 Comsol 对微波等离子体进行模拟分析的基础上,结合实验具

体分析,讨论放电参数之间的调控规律,对常见的圆柱形 MPCVD 装置进行系统的研究。利用等离子体光谱诊断分析了谐振腔内等离子体的放电特征,获得了装置中合适的功率与气压匹配值。同时,在 MPCVD 装置上进行了微米及纳米金金刚石膜制备的基础实验研究,为调控和优化高功率大面积 MPCVD 装置提供了理论与实验基础。

## 1 圆柱形 MPCVD 装置简介

本文分析的 MPCVD 装置为研究组自行研制的圆柱形单模谐振腔装置,其结构如图 1 所示,主要由微波系统、电源系统以及真空系统三大部分组成<sup>[19]</sup>。由磁控管输出的 2.45 GHz 微波经由矩形波导以主模  $TE_{10}$  传输,在传输线的终端,采用探针电激励的方式耦合到圆柱形单模微波谐振腔内,并在基片台上方激发出球形的微波等离子体。其中,传输系统中的三螺钉阻抗调配器主要用于调节整个微波系统的阻抗匹配,以期实现耦合到谐振腔内的微波能最大化,而水负载和环形器则能保证反射的微波能全被水负载定向吸收,从而达到保护微波源的目的。

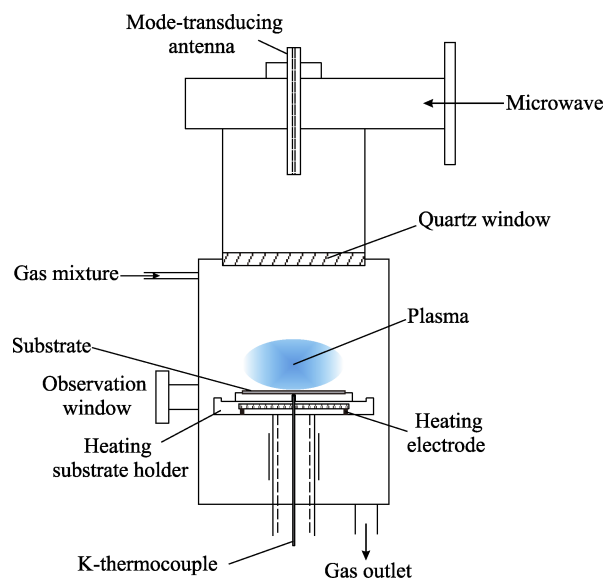


图 1 圆柱形 MPCVD 装置  
Fig.1 Schematic diagram of the MPCVD device

## 2 结果与讨论

### 2.1 MPCVD 装置等离子体理论计算

在微波等离子体装置中, 等离子体内能量的传递主要是通过加速电子与分子之间的碰撞来实现的。为了使在等离子体中耗散的高频功率达到可能的最大值, 也就是等离子体吸收的功率密度最大, 可以通过对能量转换频率进行分析来找到功率密度达到最大值的具体条件。等离子体对输入的微波能量的吸收功率密度可通过方程(1)进行求解计算。

$$P = n_e p = \frac{n_e e^2 E_0^2}{2m} \frac{\nu_c}{\omega^2 + \nu_c^2} = U_{\max} \nu \quad (1)$$

其中, 一个震荡周期内的静电能量  $U_{\max}$  和能量转换频率  $\nu$  可分别通过方程(2)和(3)进行求解计算。

$$U_{\max} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 \frac{1}{T} \oint \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{1}{4} \varepsilon_0 E_0^2 \quad (2)$$

$$\nu = \frac{2\omega_{pe}^2 \nu_c}{\omega^2 + \nu_c^2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $P$  为等离子体吸收功率密度;  $n_e$ 、 $e$  和  $m$  分别为电子密度、电子电荷和电子质量;  $E_0$  为微波电场强度;  $\omega$  和  $\omega_{pe}$  分别为能量转换频率和电子等离子体频率;  $\nu_c$  为电子碰撞频率。

在许多实验中, 通过调节气压, 可将电子碰撞频率当作一个与压强几乎成正比的函数来处理。因此, 当能量转换频率对电子碰撞频率的导数为0时, 能量转换频率可取得最大值。通过对公式(3)求导取零值计算, 可得:

$$\frac{d\nu}{d\nu_c} = \frac{2\omega_{pe}^2}{(\omega^2 + \nu_c^2)^2} (\omega^2 - \nu_c^2) = 0 \quad (4)$$

计算可得, 当外加射频频率等于电子碰撞频率  $\omega = \nu_c$  时, 能量转换频率达到最大值, 亦即此时的等离子体对输入的微波能量的吸收功率密度最大。由于电子与中性粒子的碰撞频率与气压成正比, 当气压较低时, 对应的碰撞频率也较低, 等离子体从微波场中获得的能量较低, 即等离子体吸收功率密度较低。当气压逐渐升高到一定程度时, 碰撞频率升高, 等离子体吸收功率密度也相应增加。在气压与功率相匹配的条件下(即  $\omega = \nu_c$  时), 等离子体从微波场中获得的能量达到最大。随着气压的进一步升高, 碰撞频率过高, 电子因其平均自由程变小而不能实现有效的加速, 因此等离子体吸收功率密度不增反减。

电子与中性粒子的碰撞频率为:

$$\nu_c = n_0 \sigma_0 \sqrt{kT_e / m_e} \quad (5)$$

因此, 对于 2.45 GHz 的微波等离子体而言, 能量转换频率和等离子体的吸收功率密度最大时, 气压与气体温度之间满足如下关系:

$$T_g = \frac{8}{3} P \quad (6)$$

### 2.2 MPCVD 装置等离子体数值模拟

根据理论计算可以得到, 等离子体的吸收功率密度与气压和气体温度之间有着密切的关联, 只有当温度和气压满足特定的关系时, 微波耗散在等离子体中的功率值才能达到最大。同时, 根据理论计算和前期的实验研究可知, 微波功率同样是影响微波谐振腔内等离子体相关参数的重要因素之一。等离子体的吸收功率密度除了与电子密度  $n_e$  成正比, 还与微波电场强度  $E$  的平方成正比, 而微波电场强度直接由 MPCVD 装置输入的微波功率决定, 相关研究工作在文献[19]中有详细的报道。电子密度  $n_e$  也与气压、微波功率紧密相关。

工作气压为 10 kPa 的条件下, 不同微波功率下的 MPCVD 装置的等离子体电子密度分布如图 2 所示。由图 2 可知, 当功率从 1000 W 升到 3500 W 时, 等离子体中的电子密度明显升高, 表明增加微波功率是提高等离子体电子密度的有效途径。

输入微波功率为 1000 W 的条件下, 不同工作气压下 MPCVD 装置的等离子体电子密度分布如图 3 所示。在功率和气压极度不匹配的情况下, 极难有效激发出等离子体, 因此在模拟过程中, 计算结果会出现不收敛。因而, 仅在有效的气压范围内对等离子体进行模拟计算。由图 3 可知, 当气压从 5 kPa 升到 10 kPa 时, 等离子体中电子密度同样也会升高, 特别是最低电子密度升高了 5 个数量级。表明在有效气压范围内, 等离子体中电子的均匀性会随着气压的升高而改善。

模拟可知, 微波功率和工作气压是提高电子密度的有效途径, 但在装置实际的调配过程中, 功率和气压并不是独立调控的, 它们之间存在一定的匹配关系。只有当微波功率和工作气压在相互匹配的状态下, 微波能才不会过多地耗散在微波传输线及阻抗调控器件上, 等离子体的吸收功率密度才能在各不同阶段实现最大化。

### 2.3 MPCVD 装置实验及光谱分析

由于微波谐振腔内的谐振模式在轴向上具有周期性, 因此当气压相对给定的微波功率较低时, 球会往石英介质窗处跑, 容易在石英介质窗处发生放电现象。当气压相对给定的微波功率较高时, 又会出现基片台过热的情况, 会对基片台的加工设计提出更多要求。因此, 只有在气压和功率匹配的情况下, 才能实现吸收功率密度大, 并激发出适合高质量金刚石膜生长要求的微波等离子体。结合实验和理论分析, 得到的典型圆柱形 MPCVD 装置的微波功率与工作气压的等离子体边界如图 4 所示<sup>[20]</sup>。

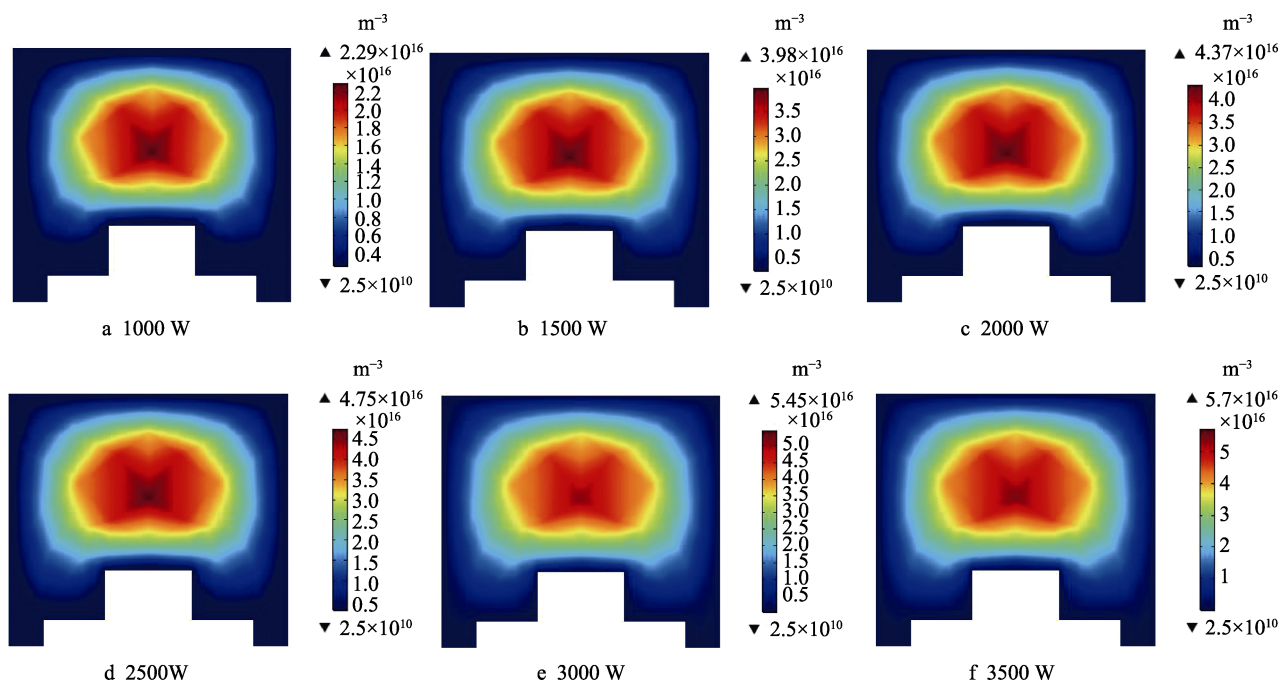


图 2 不同微波功率下的等离子体电子密度分布

Fig.2 The plasma electron density distribution inside the microwave reactors at different microwave power

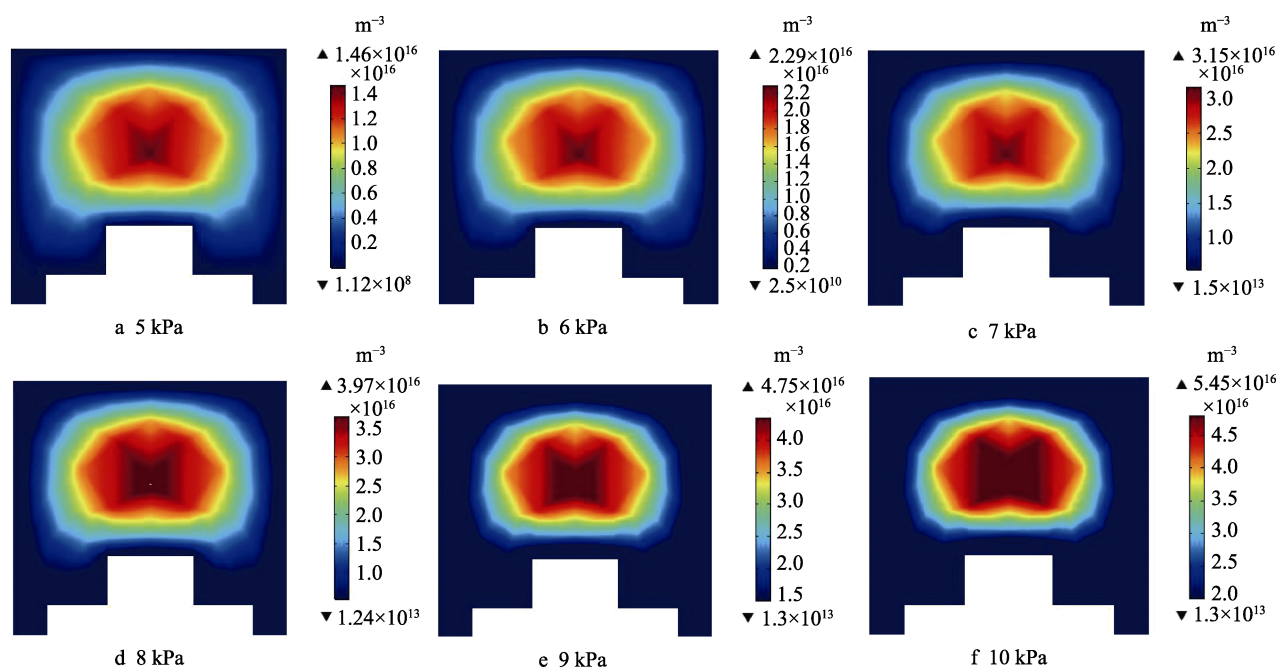


图 3 输入微波功率为 1000 W 时不同工作气压下的等离子体电子密度分布

Fig.3 The plasma electron density distribution inside the microwave reactors at different pressure when the microwave power is 1000 W

由图 4 可知, 本课题组研制的圆柱形单模 MPCVD 装置的工作气压和微波功率相互之间有一个匹配边界, 即在虚线以内的范围调控工作气压和微波功率, 都能够激发出微波等离子体。以正斜率上的等离子体激发边界为例, 当工作气压下降时, 如果对应给定的微波功率, 也就是微波谐振腔内的微波电场, 压力下降得过多, 就会超出边界范围, 此时石英介质

窗处的微波电场变强, 微波等离子体将会在窗口处激发出等离子体。同理, 以负斜率上的等离子体激发边界为例, 当工作气压升高时, 如果对应给定的微波功率压力上升太多, 也会超出边界范围, 此时基片台会出现过热的现象。因此, 如果需要圆柱形单模 MPCVD 装置能够实现长期稳定的运行, 微波功率和工作气压必须在稳定边界内运行。



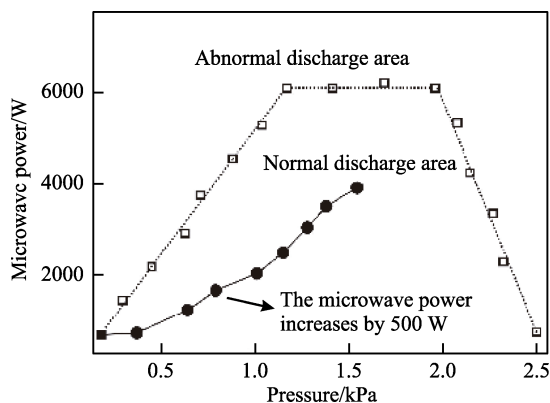


图4 圆柱形 MPCVD 装置的微波功率与工作气压边界  
Fig.4 Boundary diagram of microwave power and working pressure of cylindrical MPCVD device

结合理论与实验研究,得到本课题组自制的圆柱形单模 MPCVD 装置稳定高效运行的操作步骤,如图4所示。微波功率以 500 W 为步长逐渐升高的情况下,相应的工作气压选取在图中圆圈点处时,装置的气压和功率匹配良好,能实现微波能利用的最大化。

在工作气压不变,微波功率分别为 1500、2000、2500、3000 W 下,圆柱形单模 MPCVD 装置微波谐振腔内激发的等离子体发射光谱如图5所示。由图5可知,不同功率条件下,CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub> 的混合气体所激发的微波等离子体中都含有刻蚀非金刚相的活性基团 H<sub>α</sub>、H<sub>β</sub>,以及金刚石膜生长过程中必需的含碳活性基团 CH、C<sub>2</sub>,且活性基团的强度随着微波功率的升高而增强。

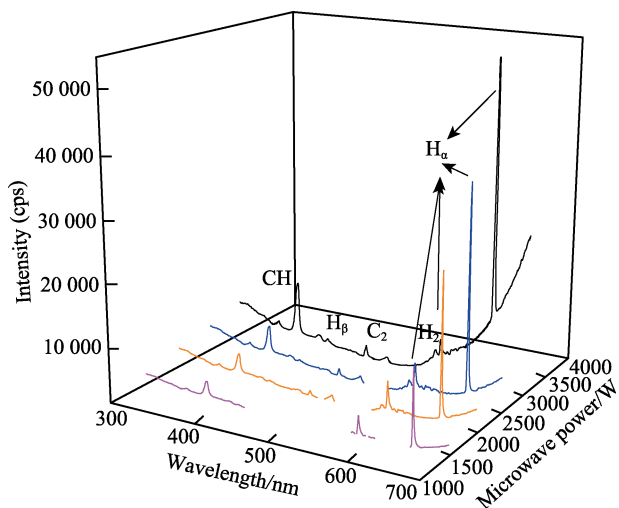


图5 不同微波功率下的等离子体发射光谱图全谱  
Fig.5 OES of the plasma at different microwave power

当工作气压一定,甲烷的体积分数为 2%时,进一步计算在不同微波功率下对腔体内激发的等离子体发射光谱,可以得到所激发的等离子体电子密度为<sup>[21]</sup>:

$$n_e = \left[ \frac{\text{FWHA}}{0.549} \right]^{1.473} \times 10^{17} \quad (7)$$

其中,FWHA (full width at half area) 为 Balmer 线系中 H<sub>α</sub> (656.19 nm) 谱线半高宽处的求和面积。

根据公式(7)的计算,可得到电子密度随着微波功率变化的趋势,如图6所示。在 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub> 的混合气体中,等离子体的电子密度随着微波功率的升高而显著增加。在 MPCVD 放电中,微波作为等离子体的激发源,是等离子体中活性基团能量的主要来源,因而微波功率是影响等离子体电子密度的关键因素之一。微波气压一定时,即谐振腔内电子碰撞的平均自由程一定的情况下,当微波功率较低时,等离子体从微波电场中获得的能量很少,因此等离子体电子密度较低。随着微波功率的升高,等离子体获得的能量也随之增加,电子密度逐渐升高。当微波功率升高到与工作气压相匹配的情况下,电子密度达到峰值。当微波功率继续升高,而工作气压仍旧维持不变时,微波功率与工作气压不能有效匹配,吸收功率密度反而会降低,即使输入的微波功率增加,但有效耦合到等离子体中的微波能反而降低,电子密度反而下降。

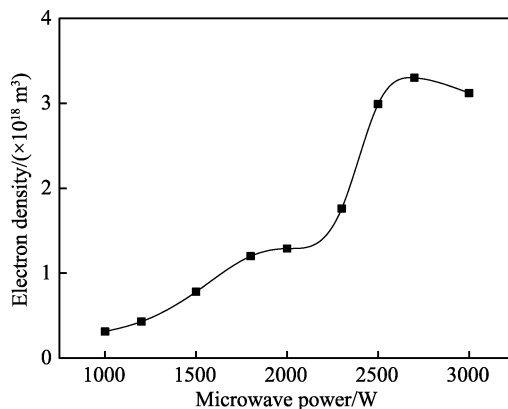


图6 电子密度随功率变化趋势  
Fig.6 Variation tendency of electron density with the microwave power

## 2.4 高质量金刚石膜的制备

在微波功率为 2800 W,工作气压为 15 kPa,甲烷的体积分数为 2%的生长条件下,开展了金刚石膜的沉积实验。实验过程中,可从观察窗口观察到等离子体密度较高的等离子体球,如图7a所示。经过 10 h 的沉积实验后,对生长的金刚石膜的表面形貌、生长结构及质量分别进行 SEM、XRD 和 Raman 光谱的表征,其结果如图7b—d所示。金刚石膜的 SEM 图显示,所沉积得到的金刚石膜晶粒生长良好,在晶面上没有看到明显的非金刚相或晶粒团聚体。金刚石膜的 XRD 表征结果显示,所获得的金刚石膜具有明显的<111>取向。金刚石膜所对应的 Raman 光谱也显示,所获得的金刚石膜在 1332 cm<sup>-1</sup>处呈现出尖锐的金刚石相特征峰。对于产生上述实验结果的原因,可解释为:金刚石膜的生长是一个 sp<sup>3</sup> 相生长和 sp<sup>2</sup> 相被刻

蚀的过程, 这个过程敏感地依赖于放电环境的状态。通过微波功率及沉积气压的调整, 可以明显提高等离子体中的电子密度。电子密度的提高, 可以显著提高利于金刚石膜生长的含碳基团的含量, 也可以增强原

子 H 对金刚石膜中  $sp^2$  相的刻蚀作用, 从而在提高金刚石膜生长速率的同时, 提高金刚石膜的质量。上述结果表明, 在较高的功率密度下, 可制备得到晶型结构良好且质量优良的金刚石膜。

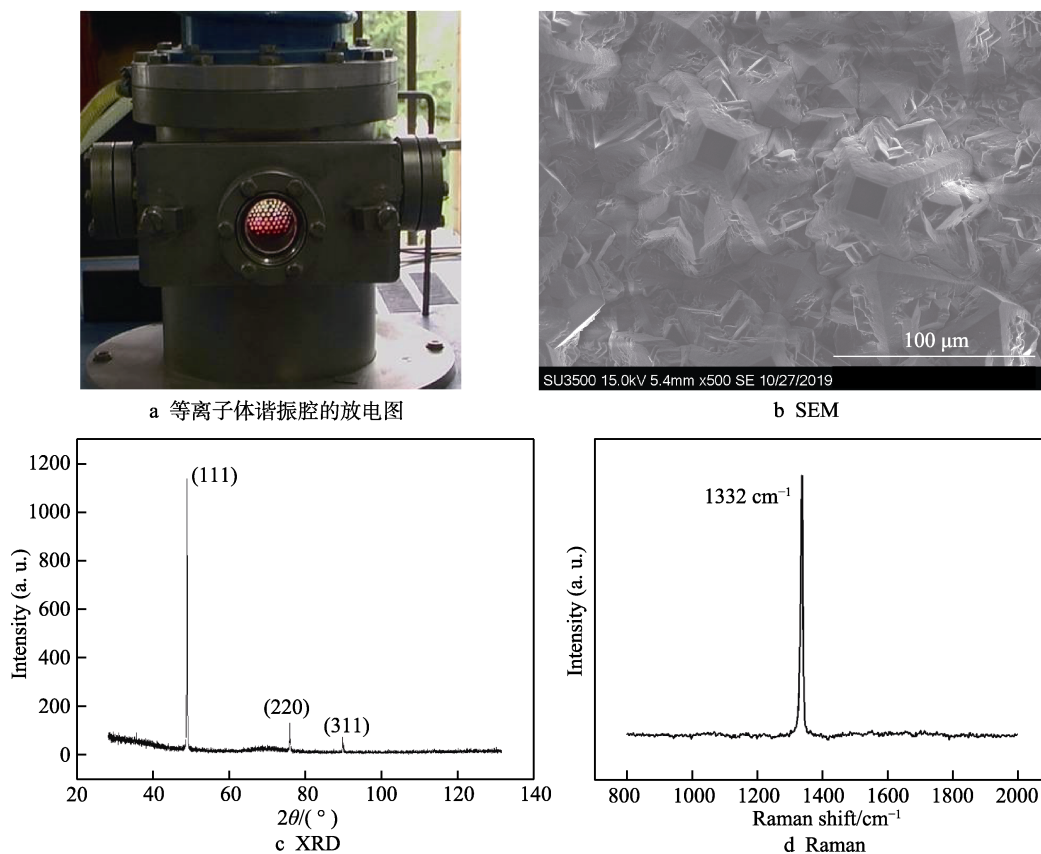


图 7 等离子体谐振腔放电和金刚石膜的 SEM、XRD、Raman 图

Fig.7 The plasma ignited in the reactor (a), the SEM image of the diamond film (b), the XRD image of diamond film (c) and the Raman image of diamond film (d)

### 3 结论

本文通过计算模拟、等离子体诊断与实验相结合的方式, 对圆柱形单模 MPCVD 装置进行了系统的研究, 获得了丰富的实验数据, 得到了等离子体与放电参数和等离子体吸收密度之间的协调规律, 并从等离子体中活性基团的运动及分布层面揭示了实现装置内微波能利用率最大化的协调机理, 主要得到以下结论。

1) 由理论模拟可得, 等离子体吸收功率密度随着气压的升高而升高, 在  $\omega = \nu_c$  时可达到最大, 随后吸收功率密度随气压的升高而减小。工作气压与气体温度之间满足  $T_g = \frac{8}{3}P$  的关系时, 吸收功率密度最大。

2) 单一地增加微波功率是提高微波等离子体电子密度的有效途径, 提高工作气压也能很大程度上增强等离子体电子密度和改善等离子体球的均匀性。但实现微波能最大化利用, 两者之间亦存在一定匹配关系。微波功率增加, 工作气压亦随之增加, 实现匹配调控, 才能实现微波能有效利用最大化。

3) 在理论模拟的指导下结合实验调控, 揭示了微波功率和工作气压之间的匹配关系, 得到了等离子体放电的稳定边界。利用光谱诊断的方法, 对不同微波功率下激发的微波等离子体进行诊断可得, 所激发的等离子体中含有大量的  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、CH 及  $C_2$  这类适合高质量金刚石膜沉积的活性基团, 功率与气压相匹配的情况下, 电子密度可达到最大值。沉积金刚石膜的实验测试结果也从另一方面验证了, 调控在最佳状态下的 MPCVD 装置更适合高质量金刚石膜的制备。

### 参考文献:

- [1] TANG S, LI P, LIU D, et al. Cutting performance of a functionally graded cemented carbide tool prepared by microwave heating and nitriding sintering[J]. High temperature materials and processes, 2019, 38: 582-589.
- [2] JHA S K, PHUAH X L, LUO J, et al. The effects of external fields in ceramic sintering[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(1): 957-970.

- [3] GONG M, PENG Q, XU Z, et al. The effect of oxygen on the epitaxial growth of diamond[J]. Journal of semiconductors, 2018, 39(12): 42-45.
- [4] YU S X, ZHANG Z, LU W Z, et al. Effect of deposition parameters on crystalline of CVD diamond[J]. Integrated ferroelectrics, 2019, 197(1): 133-138.
- [5] SONG C W, JIN R, HWANG N M, et al. Deposition behavior of boron-doped diamond with varying amount of acetone by hot filament chemical vapor deposition[J]. Electronic materials letters, 2019, 15: 630-638.
- [6] LU F X, TANG W Z, HUANG T B, et al. Large-area high-quality diamond film deposition by high power DC arc plasma jet operating at gas recycling mode[J]. Diamond & related materials, 2001, 10(9-10): 1551-1558.
- [7] 汪建华, 袁润章, 邬钦崇, 等. 用微波 ECR 等离子体溅射法在蓝宝石(0112)晶面上生长 ZnO 薄膜的研究[J]. 物理学报, 1999, 48(5): 955-960.  
WANG J H, YUAN R Z, WU Q C, et al. the study of epitaxial growth ZnO thin film on a (0112) sapphire substrate using ECR plasma sputtering method[J]. Journal of physics, 1999, 48(5): 955-960.
- [8] SUN Q, WANG J, WENG J, et al. Surface structure and electric properties of nitrogen incorporated NCD films[J]. Vacuum, 2017, 137: 155-162.
- [9] FUNER M, WILD C, KOIDL P. Novel microwave plasma reactor for diamond synthesis[J]. Applied physics letters, 1998, 72(10): 1149-1151.
- [10] FUNER M, WILD C, KOIDL P. Simulation and development of optimized microwave plasma reactors for diamond deposition[J]. Surface & coatings technology, 1999, 116-119(4): 853-862.
- [11] KING D, YARAN M K, SCHUELKE T, et al. Scaling the microwave plasma-assisted chemical vapor diamond deposition process to 150–200 mm substrates[J]. Diamond & related materials, 2008, 17(4-5): 520-524.
- [12] BESEN M M, SEVILLANO E, SMITH D K. Microwave plasma reactor: USA, 5.556475[P]. 1996-09-17.
- [13] SU J J, LI Y F, DING M H, et al. A dome-shaped cavity type microwave plasma chemical vapor deposition reactor for diamond films deposition[J]. Vacuum, 2014, 107(3): 51-55.
- [14] WENG J, LIU F, WANG J H, et al. Deposition of large-area uniform diamond films by microwave plasma CVD[J]. Vacuum, 2018, 495: 1-8.
- [15] 唐伟忠, 李义锋, 苏静杰, 等. 一种新型的 TM021 模式的高功率微波等离子体金刚石膜沉积装置: 中国, CN 103695865A[P]. 2014-04-02.  
TANG W Z, LI Y F, SU J J, et al. A new TM021 mode high power microwave plasma diamond film deposition device: China, CN 103695865A[P]. 2014-04-02.
- [16] ZOU W D. Modelling and simulation of microwave plasma reactor[J]. Plasma devices & operations, 2004, 12(3): 187-192.
- [17] LI Y F, AN X M, LIU X C, et al. A 915 MHz/75 kW cylindrical cavity type microwave plasma chemical vapor deposition reactor with a ladder-shaped circumferential antenna developed for growing large area diamond films[J]. Diamond & related materials, 2017, 78: 67-72.
- [18] 李义锋, 唐伟忠, 姜龙, 等. 915 MHz 高功率 MPCVD 装置制备大面积高品质金刚石膜[J]. 人工晶体学报, 2019(7): 1262-1267.  
LI Y F, TANG W Z, JANG L, et al. Large area high quality diamond films deposition by 915 MHz high power MPCVD reactor[J]. Journal of synthetic crystals, 2019(7): 1262-1267.
- [19] 刘繁, 翁俊, 汪建华, 等. 圆柱形单模 MPCVD 装置的数值模拟与实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(2): 50-54.  
LIU F, WENG J, WANG J H, et al. Simulation and experimental study of a cylindrical single-mode microwave plasma CVD device[J]. Diamond and abrasives engineering, 2017, 37(2): 50-54.
- [20] EEVLIO S. Microwave plasma deposition of diamond[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998: 14-23.
- [21] SHERBINI A M E, HEGAZY H, SHERBINI T M E. Measurement of electron density utilizing the H<sub>α</sub>-line from laser produced plasma in air[J]. Spectrochimica acta part B atomic spectroscopy, 2006, 61(5): 532-539.