

引用格式: CHEN Chi, ZHANG Chaoyang, FU Wenjie, et al. Electron Temperature Diagnostics in Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition by Optical Emission Spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0930001

陈驰,张朝阳,傅文杰,等. 基于发射光谱的微波等离子化学气相沉积中的电子温度诊断[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0930001

基于发射光谱的微波等离子化学气相沉积中的 电子温度诊断

陈驰,张朝阳,傅文杰,鲁钝,黄同兴,鄢扬

(电子科技大学 电子科学与工程学院,成都 610054)

摘要:在气压 40~80 Pa 和微波功率 400~800 W 条件下,使用光学发射光谱法(OES)对 Ar、CH₄ 等气体产生的等离子体进行电子温度诊断。实验结果表明,OES 法测试得到的电子温度介于 0.75 eV 到 4 eV 之间。在含碳气体的微波同轴线型等离子体中使用 OES 方法进行诊断是可行的,这些研究结果可以进一步拓展 OES 方法在等离子体增强化学气相沉积领域中的应用。

关键词:电子温度诊断;微波等离子体;朗缪尔探针;发射光谱

中图分类号:TL65

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0930001

Electron Temperature Diagnostics in Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition by Optical Emission Spectroscopy

CHEN Chi, ZHANG Chaoyang, FU Wenjie, LU Dun, HUANG Tongxing, YAN Yang

(School of Electronic Science and Engineering and Terahertz Science, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The electron temperature of the Ar/CH₄ plasma was diagnosed under the pressure of 40~80 Pa and the microwave power of 400~800 W by Optical Emission Spectrometry (OES). The experimental results show that the electron temperature obtained by the OES is between 0.75 eV and 4 eV under the above experimental conditions. Through measurement of Ar or CH₄ plasma, it is feasible to use the OES method in microwave coaxial plasma with carbon-containing gas. This research can further expand the application of the OES method in the PECVD field.

Key words: Electron temperature diagnostics; Microwave plasma; Langmuir probe; Optical emission spectrometry

OCIS Codes: 300.2140; 280.5395; 350.5400

0 引言

随着石墨烯、碳纳米管、纳米金刚石等碳纳米材料的飞速发展,利用等离子体离化含碳气体,如甲烷(CH₄)、乙炔(C₂H₂),进行化学气相沉积的方法越来越多的被采用。与传统热化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)相比,等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)具有沉积温度低,对基体的结构和物理性质影响小,膜的厚度及成分均匀性好等优点^[1-3]。

为有效控制沉积产物,对 PECVD 过程中等离子体的特性进行实时诊断与监控是十分必要的。在传统

基金项目:国家重点研发计划(No.2019YFA0210202),国家自然科学基金(No.61971097),四川科学技术计划(No.2018HH0136),四川省太赫兹科学技术重点实验室基金(No.THZSC201801)

第一作者:陈驰(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为微波等离子体电子学。Email:chenchi03@163.com

导师:鄢扬(1958—),男,教授,博士,主要研究方向为等离子体电子学、高功率微波和 THz 技术研究。Email:yanyang@uestc.edu.cn

收稿日期:2021-03-21; **录用日期:**2021-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

等离子体诊断中,Langmuir 探针法是最主要的方法^[4]。Langmuir 探针是指将探针置于带电等离子体中,通过测量其电压-电流曲线,从而估算得到等离子体的电子温度和密度等特性。但是,在使用含碳气体作为气源的 PECVD 中使用 Langmuir 探针存在诸多困难^[5-9]。含碳气体产生的等离子体中存在 C, C₂, CH 等多种含碳元素离子和活性基团等,此时如果使用朗缪尔探针,当扫描电压为负时,此类含碳粒子将大量吸附在探针表面,形成一个电容电阻层。探针吸附杂质、变脏将导致电子温度和密度等等离子体参数无法测量。因此,近年来,利用光学发射光谱法(Optical Emission Spectrometry, OES)进行非接触测量被越来越多的采用。

光学发射光谱法是使用发射光谱测量电子温度,由于不接触等离子体,因此不会出现污染等问题^[10-14]。光学发射光谱法一般通过分析等离子体反应中的原子光谱,然后通过 Boltzmann 法画图进行线型拟合后得到斜率,即得到等离子体的电子温度。在含碳气体等离子体中,虽然包含大量分子光谱,但是依然含有 H _{α} , H _{β} , H _{γ} , C 等原子光谱,通过分析这些原子的谱线,就可能对等离子体中电子温度进行分析。其缺点是有一定适用范围,在电子浓度较低条件下放电等离子体不能达到局部热力学平衡(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE),可能会导致 OSE 方法的误差较大,出现结果不准确的问题^[15-16]。

本文采用 OES 方法对一种特殊的微波同轴线型等离子体中的电子温度进行研究,通过对 Ar, CH₄ 等气体产生的等离子体进行测量,证明在微波同轴线型等离子体中使用 OES 方法是可行的,这些研究结果可以进一步拓展 OES 方法在 PECVD 领域中的应用。

1 实验设计

本文设计的可用于微波等离子化学气相沉积(Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition, MPCVD)的微波同轴线型等离子体的装置如图 1 所示。

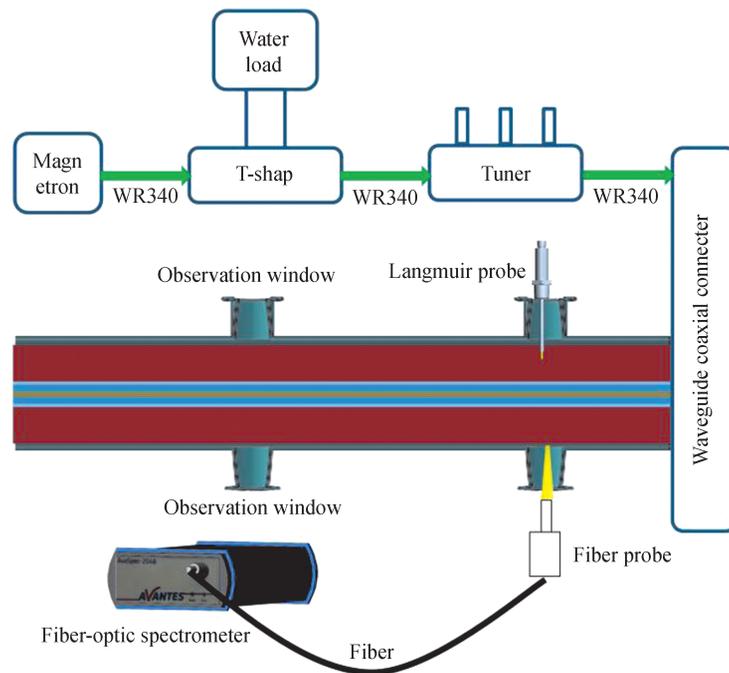


图 1 使用发射光谱和 Langmuir 探针的微波同轴线型等离子体发生装置

Fig. 1 Schematic diagram of the coaxial microwave driven Plasma with Langmuir probe and emission spectroscopy

本文所用的微波激励源为磁控管,由其产生频率固定为 2.45 GHz 的微波,功率可在 400 W~800 W 间调整。磁控管输出的微波使用 TE₁₀ 模式在 WR340 矩形波导中传输,其中矩形波导 WR340 的尺寸为 8.6 cm × 4.3 cm。

磁控管后连接一个加载了水负载的环形隔离器,使得在等离子体未激发时产生的反射波,将被水负载完全吸收,不会进入磁控管,从而使得磁控管工作状态稳定。

三销钉阻抗匹配器用于匹配阻抗,微波能最大限度得进入同轴等离子体反应腔中,将反射降到最低。传

输线的末端是波导同轴连接器,用于将微波从WR340矩形波导入同轴等离子体反应腔中激发等离子体。

同轴反应腔的结构如图2所示,该同轴等离子体反应腔使用同轴线进行微波传输。同轴波导的外径为150 mm,内导体直径为8 mm,使用玻璃管包围同轴内径。玻璃管的内径为29 mm,外径为33 mm。使用两个O形圈密封在玻璃管外壁的中形成真空密封腔。玻璃管的两端连接到O形圈密封圈,以在玻璃管的外壁和反应腔内表面之间形成真空密封腔。

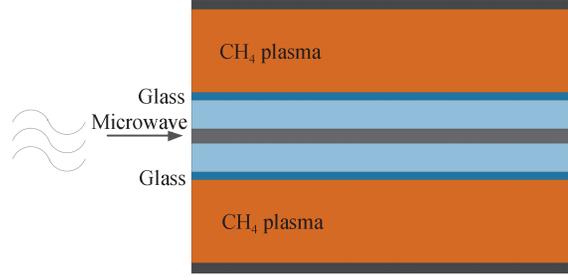


图2 同轴等离子体反应腔结构示意图

Fig. 2 The structure of the coaxial reaction cavity

实验时,先使用真空泵将真空反应腔体内的气压抽至10 Pa以下,然后再将实验气体(氩气或CH₄)持续送入等离子体反应腔中,联合调节真空泵抽速和实验气体的流量,使得腔体的气体达到气压的动态平衡,然后将微波输入腔体中激发等离子体。

实验中,除了使用传统的朗缪尔探针对等离子体进行测量外,还使用了发射光谱对等离子体激发的光谱进行测量。光纤探头放置在如图1所示的反应腔体上的一个观察窗外,探头接收到的光通过一条光纤与光谱仪相连接,光谱仪为Avantes公司生产的AvaSpec-ULS2048型光谱仪(分辨率为0.6 nm)。使用Avantes公司配备的AvaLight-CAL-Mini波长校准光源对光谱仪进行校准。

2 发射光谱测量电子温度方法

本文实验采用的同轴线型等离子体是在封闭的真空腔体中产生的,针对此类微波在封闭腔体低真空状态下激发的等离子体,一般在实验过程,可以认为它符合局部热力学平衡(LTE)工作状态。微波激发等离子体的临界密度大于 $10^{16}(\text{m}^{-3})$,因此大部分微波等离子体的密度均能大于维持局部热力学平衡(LTE)所需求的电子数密度^[16-20]。所以发射光谱被广泛用于封闭腔体低真空状态下微波等离子体中的电子温度测量^[21-27]。

采用校准后的光谱系统测量等离子体中激发态粒子辐射光谱强度 I_{mn} 可以表示为^[28]

$$I_{mn} = \frac{\Omega}{4\pi} N_m A_{mn} h\nu_{mn} V \quad (1)$$

式中,下标 m 和 n 分别表示粒子的高能级和低能级。 N_m 是高能级粒子数密度, A_{mn} 是从高能级 m 到低能级 n 的概率, Ω 是收集立体角, V 是光谱系统观测到的等离子体体积, $h\nu_{mn}$ 是跃迁所发出光子的能量,其中 ν_{mn} 为光的频率,波长与光频率的关系为

$$\lambda_{mn} = \frac{c}{\nu_{mn}} \quad (2)$$

式中, c 为光速,将式(2)带入式(1),即有

$$I_{mn} = \frac{\Omega c}{4\pi\lambda_{mn}} N_m A_{mn} hV \quad (3)$$

在局部热力学平衡(LTE)状态下,高能级粒子数密度与总粒子数密度之间满足Maxwell-Boltzmann分布,即

$$N_m = N_0 \frac{g_m}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (4)$$

式中, N_m 是高能级粒子数密度, N_0 是总粒子数密度, g_m 是统计权重, E_m 是激发态能量,那么两个能级粒子密度关系为

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_e}\right) \quad (5)$$

如果发射光谱中的两条谱线是在相同位置上的同一光谱仪上测得,则有^[29]

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1 \lambda_2 A_1}{N_2 \lambda_1 A_2} = \frac{g_1 \lambda_2 A_1}{g_2 \lambda_1 A_2} \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT_e}\right) \quad (6)$$

在式(6)两边以自然数e为底,取对数可得

$$\ln\left(\frac{I_1\lambda_1A_2g_2}{I_2\lambda_2A_1g_1}\right) = -\frac{E_1 - E_2}{kT_e} \quad (7)$$

将两条谱线参数分开,那么式(7)可以改写为

$$\ln\left(\frac{I_1\lambda_1}{A_1g_1}\right) - \ln\left(\frac{I_2\lambda_2}{A_2g_2}\right) = -\left(\frac{E_1}{kT_e} - \frac{E_2}{kT_e}\right) \quad (8)$$

实验中使用了多条谱线来提高精度,式(8)可以写为

$$\ln\left(\frac{\lambda_i I_i}{A_i g_i}\right) = -\frac{1}{kT_e} E_i + C \quad (9)$$

式中,C是常数,通过NIST光谱数据库,可以得到每条发射光谱谱线的参数值,将所采用的谱线代入式(9),通过Boltzmann法画图,拟合曲线的斜率,就可以计算出电子温度 T_e 。

为了验证通过Boltzmann画图法得到等离子体电子温度的可行性,在Ar等离子体中,同时使用发射光谱和Langmuir探针测量电子温度。测得的发射光谱如图3所示。

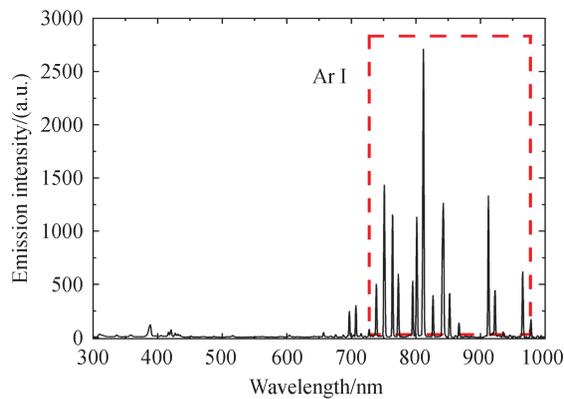


图3 气压80 Pa微波功率800 W时Ar等离子体的光谱

Fig. 3 The spectrum of Ar plasma driven by 800 W microwave at the pressure of 80 Pa

从光谱中可以看出,Ar I光谱的峰非常明显,强度很高,可以提高电子温度的测量精度。尽管Ar的光谱线很多,但这并不意味着所有谱线都适用于计算电子温度,因为某些光谱线与其他具有不同波长的光谱线的叠加非常接近,除了存在Stark加宽之外,多普勒展宽也会降低准确性。因此,计算电子温度时应该选择那些具有较小半峰全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)的谱线。表1是本文所选氩气光谱线及其相应参数。

表1 Ar等离子体中的Ar I谱线光谱参数^[30]

Table 1 Spectroscopic data of chosen lines in Ar plasma^[30]

Wavelength/nm	Transition coefficient/s ⁻¹	Statistical weight	Excitation energy/eV
706.721 7	3.80×10^6	5	13.302 23
763.510 5	2.45×10^7	5	13.171 78
772.420 7	1.17×10^7	3	13.327 86
801.478 5	9.30×10^6	5	13.094 87
866.794 3	2.43×10^6	3	13.153 14
912.296 7	1.89×10^7	3	12.907 02
922.449 8	5.00×10^6	5	13.171 78
978.450 2	1.47×10^6	5	13.094 87

使用图3中峰值和表1中的参数,代入式(8)计算指定光谱线的值。画多个点并进行线性回归,拟合线的斜率可用于计算电子温度,结果如图4所示,从中可以得出此时的电子温度为1.452 eV。

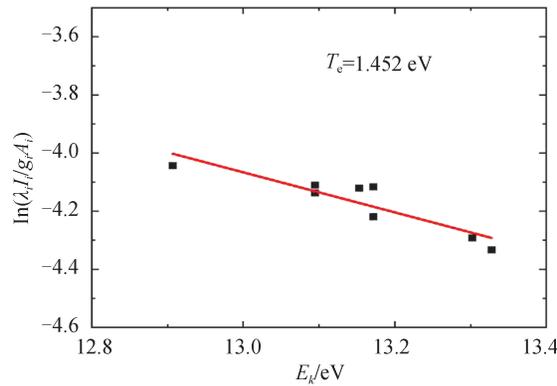


图4 Ar谱线玻尔兹曼画图
Fig. 4 Boltzmann plot for Ar lines

为了充分验证通过OES计算电子温度的准确性,实验中还同时使用朗缪尔探针进行电子温度测量,Langmuir探针通过加载一个扫描电压,然后分析采样所得的 $V-I$ 曲线,从而计算出电子温度。同时为了更大范围的验证OES计算电子温度的可靠性,分别改变微波功率和气压,得到不同状态的微波等离子体,然后同时使用OES和Langmuir探针电子温度进行多次测量,使用测量所得的平均值画图,测得的最大值和最小值作为误差的上下限,结果如图5所示。

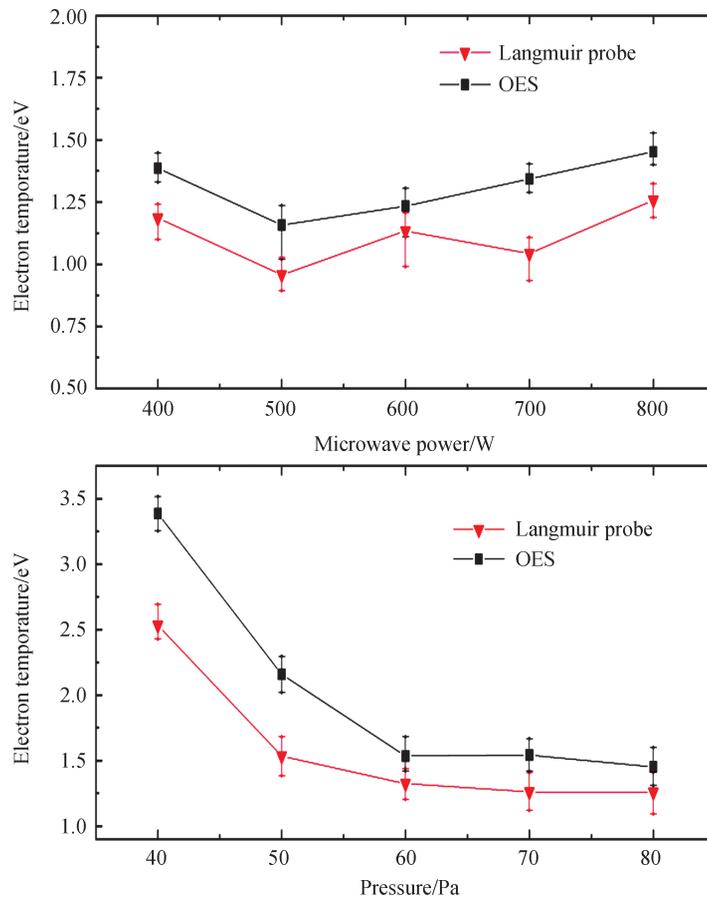


图5 不同微波功率和压力下Langmuir探针和OES测量的电子温度

Fig. 5 The microwave power and pressure against the electron temperature measured by the Langmuir probe and OES

当微波功率增加时,电子温度不会显著变化,但是当压力增加时,电子温度显著降低。比较OES和Langmuir探针获得的电子温度,OES获得的电子温度 $T_{e,oes}$ 略高于探针获得的 $T_{e,probe}$ 。这可能是由于OES的电子温度测量结果仅反映了有助于氩气激发和电离过程的那些电子。更准确的说OES所测量的是能量高

于激发和电离阈值的电子^[31]。而相对的Langmuir探针所测量的是电子的平均温度。因此, $T_{e,oes}$ 略高于正确的电子温度。但是由图5可知, $T_{e,oes}$ 和 $T_{e,probe}$ 之间的趋势是相同的。因此,可以通过OES对不同实验情况下的电子温度进行分析。

3 使用OES测量同轴线型CH₄微波等离子体的电子温度

使用CH₄作为气源时,当气压设定在80 Pa时,输入800 W微波功率激发等离子体,从观察窗观察到CH₄被电离,如图6所示。此同轴线型CH₄微波等离子体测得的发射光谱图7所示。



图6 压力80 Pa微波800 W时同轴线型CH₄等离子体
Fig. 6 Coaxial line CH₄ plasma driven by 800 W microwave at fill pressure of 80 Pa

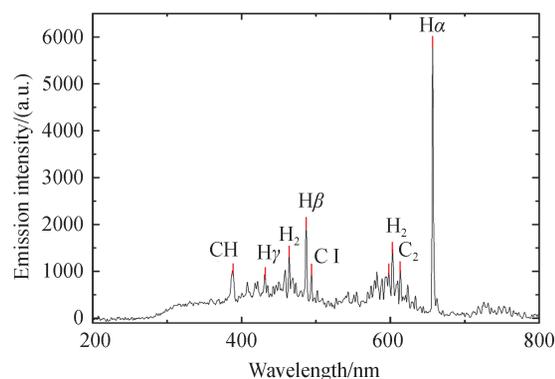


图7 气压80 Pa微波功率800 W时CH₄等离子体的光谱
Fig. 7 The spectrum of CH₄ plasma driven by 800 W microwave at the pressure of 80 Pa

从图7可以看出H_α谱线强度较强,证明等离子体球中产生了浓度较高的H自由基,而H自由基可有效蚀刻sp²C和石墨等非金刚石相^[32],有利于高纯度金刚石样品的制备。此光谱中没有检测到CH₃和CH₂谱线,这可能是由于如下原因^[32]。

1)在CH₄等离子体中碳氢基团与氢发生了转换: $CH_y + H \rightleftharpoons CH_{y-1} + H_2$ ($y=4\sim 1$), CH₄以及CH₃, CH₂基团,经过变化 $CH_4 \rightarrow CH_3 \rightarrow CH_2 \rightarrow CH$,最终得到CH基团。

2)考虑到光谱中检测到了C₂基团,那么CH₃和CH₂基团还很有可能发生了的转化过程是 $CH_2 + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_4 + H$, C₂H₄基团与氢间发生反应 $C_2H_x + H \rightleftharpoons C_2H_{x-1} + H_2$ ($x=4\sim 1$)。最终C₂H₄基团经过 $C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 \rightarrow C_2H_2 \rightarrow C_2H \rightarrow C_2$ 生成了相对稳定的C₂基团。

从图7可以看出,CH₄等离子体中存在C、C₂、CH等多种含碳元素离子和分子等,如果使用朗缪尔探针,当扫描电压为负时,此类含碳分子将大量吸附在探针表面,形成一个电容电阻层,给探针测量带来大量噪声,导致无法准确测得探针的V-I曲线,如图8所示。

从图8可以看出,使用朗缪尔探针在高含量CH₄等离子体中进行扫描电压测量时,会有大量噪声干扰,无

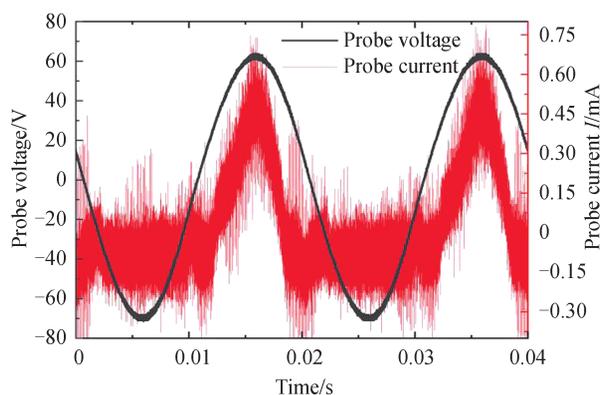


图8 CH₄等离子体中朗缪尔探针的电压和电流曲线
Fig. 8 The voltage and current curve of the Langmuir probe in CH₄ plasma

法准确绘制探针的 V - I 曲线,而 OES 为非接触式测量,不会受到此类干扰。 CH_4 等离子体中包含的原子光谱主要为 H_α , H_β , H_γ 等谱线,其相应参数如表 2 所示。

表 2 CH_4 等离子体中的原子谱线光谱参数^[30]
Table 2 Spectroscopic data of chosen lines in CH_4 Plasma^[30]

	Wavelength/nm	Transition coefficient / s^{-1}	Statistical weight	Excitation energy/eV
H_γ	434.047	2.53×10^6	50	13.0545
H_β	486.135	8.41×10^6	32	12.7485
H_α	656.279	4.41×10^7	18	12.0875

使用 OES 多次测量不同微波功率和不同气压下的 CH_4 等离子体电子温度,使用测量所得的平均值画图,测得的最大值和最小值作为误差的上下限,结果如图 9 所示。

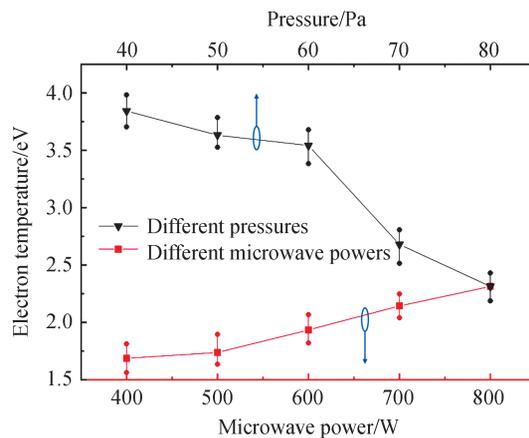


图 9 通过发射光谱测得不同微波功率和压力下的电子温度

Fig. 9 The microwave power and pressure against the electron temperature by OES

由图 9 可知当微波功率改变时, CH_4 等离子体中的电子温度随微波功率的上升而上升。与之相比, Ar 等离子体在微波功率增加后, 电子温度没有显著变化。这可能是由于微波功率影响电子温度的方式主要是通过增大等离子体的放电区域来实现的。对于 Ar 等离子体, 较小的微波功率就能使得等离子体充满腔体。因此微波功率增加后, 电子温度没有显著变化; 而对于 CH_4 等离子体, 等离子体放电区域将随着微波功率的增大而逐渐增大, 从而使得反应腔内的整体电子温度升高^[23,33]。

当功率一定, 气压上升时, Ar 等离子体和 CH_4 等离子体中的电子温度均显著降低。这是因为在功率一定的情况下, 压力增加那么腔体中的粒子总密度将随之增加。因此, 中性粒子与电子碰撞率也变高, 电子能量更多向中性粒子转移, 从而导致电子温度降低。与微波功率对电子温度的影响相比较, 气压对电子温度的影响明显更加显著。这也与文献[23,31,33]中所描述的情况相同。

4 结论

本文利用光学发射光谱法(OES)对可用于微波等离子化学气相沉积(MPCVD)的微波同轴线型等离子体进行了在线诊断。在 Ar 等离子体中, 当微波功率增加时, 电子温度不会显著变化, 但是当压力增加时, 电子温度显著降低。比较 OES 和 Langmuir 探针获得的电子温度, OES 获得的电子温度 $T_{e, \text{o es}}$ 略高于探针获得的 $T_{e, \text{probe}}$ 。这可能是由于 OES 的测量结果仅反映了一部分电子的温度, 特别是高能电子。但是 $T_{e, \text{o es}}$ 和 $T_{e, \text{probe}}$ 之间的趋势是相同的。因此, 可以通过 OES 对不同实验情况下的电子温度进行分析。

在 CH_4 等离子体中进行了发射光谱诊断, 结果表明此 CH_4 等离子体中存在 C 、 C_2 、 CH 、 H 等分子和原子。其中, H_α 谱线强度较强, 证明等离子体球中产生了浓度较高的 H 自由基。通过 Boltzmann 法分析了功率以及气压对此 CH_4 等离子体电子温度的影响。结果显示电子温度随微波功率的上升而上升, 而当气压增加时, 电子温度将显著的降低。

由 OES 对 Ar、CH₄ 等气体产生的等离子体电子温度测量可知,在微波同轴线型等离子体中使用 OES 方法是可行的。在微波同轴线型等离子体,可以使用 OES 对等离子体的电子温度进行实时诊断与监控。

参考文献

- [1] LIEHR M, DIEGUEZ-CAMPO M. Microwave PECVD for large area coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2005,200:21-25.
- [2] GOSAR Z, PEVEC S, et al. Deposition kinetics of thin silica-like coatings in a large plasma reactor[J]. Materials, 2019, 12:3238.
- [3] COLE M T, MILNE W I. Plasma enhanced chemical vapour deposition of horizontally aligned carbon nanotubes[J]. Materials, 2013,6:2262-2273.
- [4] CHEN F F. Langmuir probe diagnostics[C]. IEEE-International Conference on Plasma Science (ICOPS), Jeju, Korea, 2003.
- [5] SAMARA V, BOOTH J, MARNEFFE J, et al. A dc-pulsed capacitively coupled planar Langmuir probe for plasma process diagnostics and monitoring[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21:65004.
- [6] GABORIAU F, PEIGNON M, CARTRY G, et al. Langmuir probe measurements in an inductively coupled plasma: Electron energy distribution functions in polymerizing fluorocarbon gases used for selective etching of SiO₂[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2002, 20:919-927.
- [7] CHERRINGTON B. The use of electrostatic probes for plasma diagnostics—a review[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2018(2):113-140.
- [8] OYAMA K. An introduction to space instrumentation[M]. TERRAPUB, Tokyo, 2013.
- [9] MyNAZ, SHUKRULLAH S, GHAFAR A, et al. Test of a new tip material for Langmuir probe diagnostic[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2016, 57(2):211-218.
- [10] REGODON G, DIAZ-CABRERA J, FERNANDEZ PALOP J, et al. Influence of the ion mass in the radial to orbital transition in weakly collisional low-pressure plasmas using cylindrical langmuir probes[J]. Applied Sciences, 2020, 10: 5727.
- [11] STRUTYNSKI C, TEULE-GAY L, DANTO S, et al. Optical emission detector based on plasma discharge generation at the tip of a multimaterial fiber[J]. Sensors, 2020, 20: 2353.
- [12] TU X, CHERON B G, YAN J H, et al. Electrical and spectroscopic diagnostic of an atmospheric double arc argon plasma jet[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16:803-812.
- [13] HIRAO K, OYAMA K. A critical study on the reliability of electron temperature measurements with a langmuir probe [J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1972, 24(4):415-427.
- [14] LI Shouzhe. Development and optical emission diagnosis of atmospheric-pressure microwave plasma torch[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45:3730-3735.
李寿哲. 大气压微波等离子体炬的开发和发射光谱诊断[J]. 高电压技术, 2019, 45:3730-3735.
- [15] NUMANO M, FURUKAWA O, MICHİYOSHI I. Comparison of langmuir probe and spectroscopic electron temperature measurements[J]. Plasma Physics, 1971, 13:992-995.
- [16] WANG Yan. Development and experimental study of spectroscopic diagnostic system of high current beam source[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
王艳. 强流束源光谱诊断系统研制与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.
- [17] ROTH J R. Industrial plasma engineering volume1[M]. Science Press:268-278.
- [18] RICHTER J. Plasma diagnostics[M]. Amsterdam, North-Holland, 1968.
- [19] GRIE H R. Validity of local thermal equilibrium in plasma spectroscopy[J]. Physical Review, 1963, 131(3):1170.
- [20] HEY J D, CHU C C, RASH J P S. Partial local thermal equilibrium in a low Temperature hydrogen plasma[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1999, 62(3):371-387.
- [21] ABDEL-FATTAH E, BAZAVAN M, SHINDO H. Temperature measurements in microwave argon plasma source by using overlapped molecular emission spectra[J]. Phys Plasmas, 2015, 22:93509.
- [22] MOHSENIAN S, SHETH S, BHATTA S. Design and characterization of an electromagnetic-resonant cavity microwave plasma reactor for atmospheric pressure carbon dioxide decomposition[J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, 16(2):1800153.
- [23] DERKAOU I N, ROND C, GRIES T, et al. Determining electron temperature and electron density in moderate pressure H₂/CH₄ microwave plasma[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(20):205201.
- [24] KANO K, SUZUKI M, AKATSUKA H. Spectroscopic measurement of electron temperature and density in argon plasmas based on collisional-radiative model[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2000, 9:314-322.
- [25] XIONG Q, NIKIFOROV A Y, GONZÁLEZ M Á, et al. Characterization of an atmospheric helium plasma jet by relative and absolute optical emission spectroscopy[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2013,22:15011.

- [26] ZHANG B, WANG Q, ZHANG G, et al. Experimental study on the emission spectra of microwave plasma at atmospheric pressure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115:43302.
- [27] SHIMOZUMA M, TOCHITANI G, TAGASHIRA H. Optical emission diagnostics of H_2+CH_4 50Hz 13.56MHz plasmas for chemical vapor deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70: 645-648.
- [28] GRIEM H R, *Plasma Spectroscopy*[M]. New York, 1964.
- [29] HAO X, SONG G. Spectral analysis of the plasma in low-power laser/arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37:76-82.
- [30] National Institute of Standards and Technology Data Base [OL]. Available: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.
- [31] QAYYUM A, DEEBA F, AHMAD S, et al. Optical emission and langmuir probe diagnostic measurements in DC electrode pulse discharge in nitrogen[J]. *High Temp*, 2019, 57: 821-31.
- [32] MA Zhi-bin, WU Jian-peng, TAO Liping, et al. Optical emission spectroscopy of MPCVD plasma[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(9):2562-2565.
马志斌,吴建鹏,陶利平,等. MPCVD等离子体的发射光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(9):2562-2565
- [33] CHUNG T H, KANG H R, BAE M K. Optical emission diagnostics with electric probe measurements of inductively coupled Ar/O₂ plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19:113502.