光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250210001

预制棒POVD工艺中等离子体温度的光谱测量

程兆裕[1]，陈京京[1,2]，李晓婉[1]，陈娅丽[2]，沈熙唯[2]，沈海平[1*]

（1. 复旦大学 信息科学与工程学院，上海 200438；2. 中天科技精密材料有限公司，江苏 南通 226009）

摘　要： 等离子体外部气相沉积法（POVD）可用于制造高质量的光纤预制棒，其中高频感应等离子体炬的温度诊断是确保光纤预制棒质量和性能的关键。然而，在实际测量环境中，因等离子体物理过程的复杂性和不稳定性，温度诊断常面临一致性和准确性不足的问题。文章基于非接触式发射光谱诊断技术，对POVD工艺中等离子体光谱数据绘制Boltzmann图，通过拟合计算得出等离子体温度。为提高电子温度的计算准确性，提出一套适用于各阶段各元素的等离子体光谱谱线筛选标准。经筛选后，各阶段拟合线性度均优于0.96，且不同积分时间下测温结果的变异系数也从原来的20.74％降至5.55％。结果表明，所提出的等离子体光谱谱线筛选标准能够有效提升等离子体温度诊断的一致性和准确性。

关键词： 光纤预制棒；等离子体外部气相沉积法；光谱；等离子体温度诊断；一致性

中图分类号： TN25　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0936－07

Determining Plasma Temperature in Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition for Prefabricated Rods via Emission Spectroscopy

CHENG Zhaoyu[1], CHEN Jingjing[1,2], LI Xiaowan[1], CHEN Yali[2], SHEN Xiwei[2], SHEN Haiping[1]

（1. School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, CHN;
2. Zhongtian Technology Advanced Materials Co.,Ltd., Nantong 226009, CHN）

Abstract: Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) is widely used to fabricate high-quality optical fiber preforms, where accurate temperature diagnostics of high-frequency induction plasma torches are critical for ensuring quality and performance. However, the complexity and instability of plasma dynamics often limit the accuracy and consistency of conventional diagnostic methods. In this study, plasma temperatures in PECVD were determined using non-contact optical emission spectroscopy combined with the Boltzmann plot method. To enhance the accuracy of the calculation of electron temperature, we propose a set of selection criteria for spectral lines tailored to each element across process stages. With the optimized selection, the linearity of the Boltzmann plots exceeded 0.96 at all stages, and the coefficient of variation of the obtained temperature values across different integration times decreased from 20.74％ to 5.55％. The results demonstrate that the proposed screening criteria can effectively enhance both the consistency and accuracy of plasma temperature diagnostics.

Key words: fiber optic preforms; PECVD; spectroscopy; plasma temperature diagnostics; consistency

收稿日期：2025－02－10.

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC2604700）.

* **通信作者：**沈海平

0　引言

光纤预制棒是光纤制造的核心基础材料，其质量直接决定了光纤的最终性能与通信网络的可靠性和效率。在预制棒的等离子体外部气相沉积（POVD）工艺中，含硅化合物在高温等离子体作用下发生氧化反应，是实现材料沉积的关键步骤。因此，高频感应等离子体炬的温度控制成为影响化学反应速率和产品质量的重要因素。目前，等离子体温度诊断常用的方法有探针法、质谱法和光谱法[1-3]。其中，非接触式的光谱诊断技术，尤其是原子发射光谱法和激光吸收光谱法，因其具有高灵敏度和实时测量能力，被广泛应用于高温等离子体的诊断研究中。

然而，在实际POVD工艺环境中，高温等离子体往往呈现出明显不稳定性和空间不均匀性。加之化学反应过程中元素成分复杂，谱线之间存在严重干扰，导致不同研究者基于光谱法测得的温度测量结果往往重复性较差、准确性有限。葛国伟等[4]通过提升探针法的时间和空间分辨率，改善了等离子诊断的可靠性；周学铁等[5]则发现通过精确选择光谱参数（如统计权重g、跃迁几率A和谱线上能级能量E_i），可有效提高Boltzmann图法测量等离子体温度的准确性。

基于上述背景，本文提出一种应用于预制棒的POVD工艺环境下的等离子体光谱谱线筛选标准方法，以提高等离子体温度测量的准确性和可靠性，为工艺优化提供可靠依据。

1　光谱测温系统与原理

1.1　光纤预制棒POVD光谱测温系统

如图1为光纤预制棒POVD光谱测温系统[6]。

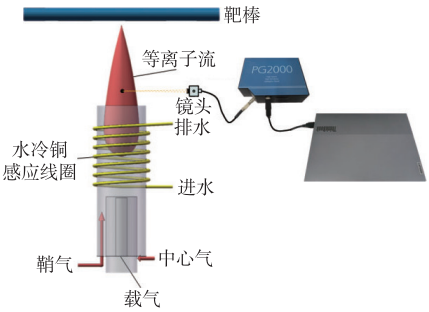


图1　光纤预制棒POVD光谱测温系统图

图1左侧是光纤预制棒POVD工艺结构，该工艺可划分为三个阶段，其划分依据主要基于气体成分的变化以及反应类型的不同。在第一阶段中，纯氩气被通入等离子体发生器内，氩气击穿起弧，对等离子体发生器内的介质进行加热，从而产生热等离子体，为后续反应提供高温环境。进入第二阶段，等离子体发生器内充入大量的氧气和氮气，其气体量大约是第一阶段中氩气的60倍。这一阶段的主要目的是通过改变气体组成来调整反应条件，为后续的氧化还原反应做准备。在第三阶段，等离子体反应器内发生了制备SiO_2的氧化还原反应。化学式为：

$$SiCl_4 + O_2 = SiO_2 + 2Cl_2 \tag{1}$$

形成致密的SiO_2颗粒沉积在靶棒表面，靶棒在等离子体炬上方左右来回移动，逐层沉积，达到预期重量结束。

图1右侧展示的是光谱法测温系统的关键部分。等离子体发生器内部的高温流场会产生辐射发光，这些光信号通过一个特殊的光纤镜头进行采集。该光纤镜头具备空间点分辨测量能力，能够精准地捕捉高温流场中不同位置的辐射发光信息。随后，这些辐射发光信号通过光纤传输至光纤光谱仪，光谱仪会对信号进行波长分辨处理，从而获取目标组分在680～780 nm波长范围内的发射光谱谱线。为确保光谱测量系统的准确性和可靠性，在实验开始之前，使用一台钨灯标准光源对该系统进行波长标定。最终，所获得的光谱数据将依据发射光谱法测温原理，通过计算机进行分析和计算，得到等离子体的温度信息。

1.2　发射光谱法测温原理

采用光谱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：

$$I_{mn} = \frac{\Omega}{4\pi} N_m A_{mn} h\upsilon_{mn} V \tag{2}$$

式中，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，$h\upsilon$是跃迁所发出光子的能量[7]。

高频感应等离子体可以产生化学纯净、无污染的高温低速流场，在实验过程中，可以认为它符合局部热力学平衡的工作状态。在局部热力学平衡状态下，高能级粒子数密度N_m与总粒子数密度N_0之间满足Maxwell-Boltzmann分布，即：

$$N_m = N_0 \frac{g_m}{Q(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \tag{3}$$

式中，g_m是统计权重，$Q(T)$为配分函数，k为玻尔兹

曼常数，E_m为高能级能量。选择发射光谱中两条同一光谱仪测得的相同元素的谱线，结合式(2)和(3)可得光谱强度I_1，I_2之间的关系：

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_1\lambda_2A_1}{N_2\lambda_1A_2}=\frac{g_1\lambda_2A_1}{g_2\lambda_1A_2}\exp\left(-\frac{E_1-E_2}{kT}\right) \quad (4)$$

经过数学推导可得：

$$\ln\left(\frac{I_1\lambda_1}{g_1A_1}\right)-\ln\left(\frac{I_2\lambda_2}{g_2A_2}\right)=-\left(\frac{E_1}{kT}-\frac{E_2}{kT}\right) \quad (5)$$

测温时需要使用多条谱线来提高测温精度，那么可以将式(5)写为：

$$\ln\left(\frac{I_i\lambda_i}{g_iA_i}\right)=-\frac{1}{kT}E_i+C \quad (6)$$

计算时通过查阅谱线波长对应的原子跃迁参数，以高能级能量E_m为横坐标，$\ln(I\lambda/g_uA)$为纵坐标，绘制二者关系曲线，拟合直线的斜率为$-1/KT$，由此即可求得温度T[8]。

因此根据已有的文献选择氩气在680～780 nm范围内的13条谱线，具体的氩气光谱参数见表1[9]。

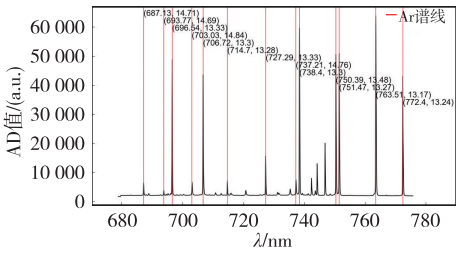
表1 Ar谱线光谱参数

序号	λ/nm	E_m/eV	gA/cm^{-1}
1	687.13	14.71	8.34×10^6
2	693.77	14.69	3.08×10^6
3	696.54	13.33	1.92×10^7
4	703.03	14.84	1.34×10^7
5	706.72	13.30	1.90×10^7
6	714.70	13.28	1.88×10^6
7	727.29	13.33	5.49×10^6
8	737.21	14.76	1.70×10^7
9	738.40	13.30	4.24×10^7
10	750.39	13.48	4.45×10^7
11	751.47	13.27	4.02×10^7
12	763.51	13.17	1.22×10^8
13	772.40	13.24	1.03×10^7

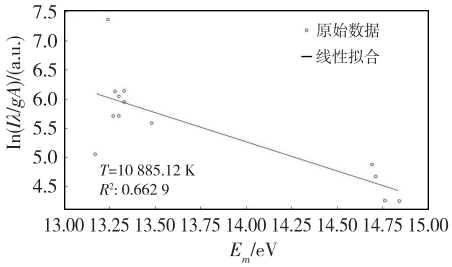
2 光谱数据优化处理方法研究

2.1 常规处理方法

图2(a)给出了利用光谱仪获得的Ar等离子体在680～780 nm波长范围内的发射光谱图，其中积分时间设置为1 ms；图2(b)给出了利用表中的13条Ar谱线测温，通过Boltzmann画图法得到的拟合图，最终测得的等离子体温度为10 885.12 K，直线的拟合优度相关系数R^2是0.662 9，可以看出13个用作拟合的点并没有展现出非常好的线性，从图中也可以发现这一点，尤其是左边的点，分散在直线的上下。



(a) 等离子体发射光谱图



(b) Ar谱线Boltzmann拟合图

图2 积分时间1 ms的第一阶段等离子体温度初步分析

为检验测温的一致性，以图2(b)中拟合的直线为分界，分别用拟合线以上的7个点和拟合线以下的6个点拟合计算，采用不同的点进行拟合将得到不同的测量结果，得到的结果记录在表2。

表2 常规测温方法一致性检验

拟合点	13个点	上方7个点	下方6个点
T/K	10 885.12	9 042.35	14 801.18
R^2	0.662 9	0.825 5	0.811 2

实验采用这三次测温结果的变异系数CV来表示测温结果的一致性：

$$CV=\frac{\sigma}{\mu} \quad (7)$$

式中，σ为数据集的标准差，μ为平均值。

经过计算测温结果之间的变异系数CV为20.74%。该结果偏大，说明测温结果没有取得很好一致性。

在等离子体温度测量中，测量结果的一致性差，严重制约了其实际应用。因此，需要在拟合计算等离子体温度之前，建立一套谱线优化选择方法，使得测量结果达到较好的一致性和可信度。

2.2 优化谱线选择

在图2(b)中，谱线点的离散性较大，这一现象表明各谱线点的可信度存在显著差异。具体而言，某些谱线信号较弱，在测量过程中易受到误差的干扰，从而导致其偏离“真实”拟合直线的程度较大。因此，提高测量结果一致性和可信度的关键在于筛

选出最可信的谱线点，这样可以有效减少测量误差，进而提高光谱法测温的准确性和可靠性。

为深入探究光谱峰值稳定度对测温结果的影响，本研究模拟了光谱仪测量误差，将所有Ar谱线的峰值点AD值分别上下浮动1%，计算测温结果的平均相对变化率为0.73%，这表明微小噪声也会导致测温误差。选择高信噪比的谱线能够抑制噪声干扰，是因为信噪比越高，噪声对信号的相对贡献越小，从而减少峰值波动，提高测温稳定性。根据现有的实验数据，实验选择信噪比大于10的谱线用于测温拟合。由于光谱仪的最大测量值是65 535，太靠近最大测量值可能会引起较大的测量误差，所以AD值大于60 000的谱线不能用作测温，再结合现有的实验条件，如果将信噪比阈值再提升，会导致用于拟合的谱线数量不足。

针对波长准确率对测温结果的影响，本研究将所有Ar谱线的波长值逐一左右移动一个光谱仪带宽$\Delta\lambda$（约为0.55 nm），同时对应的AD值也随之移动，计算测温结果的平均相对变化率为49.13%，这表明即使微小的波长干扰也会造成显著的测温误差。而在光谱法测温中最常见的波长干扰是两条谱线间距过近导致的峰值点误判，当相邻的两条谱线中心波长之差小于$\Delta\lambda$时，两条谱线的波峰会重叠，不但会相互影响AD值，还会影响对波峰位置的判断。由此可见，用于光谱法测温的谱线需要满足相互独立的原则，本文以使用的光谱仪的带宽$\Delta\lambda$作为判断谱线独立的阈值。

最后，本文对谱线的能级选择对测温结果的影响开展了研究，分别选择了表1中所有高能级能量小于13.48 eV的谱线和所有大于14.69 eV的谱线测温，得到的测温结果与使用所有谱线的测温结果相比均存在较大偏差，且线性度不足以支持等离子体温度精确测量。所以在用于拟合测温的谱线中至少需要有两条谱线的高能级能量差大于1 eV，以此保证Boltzmann画图测温法的准确性。

基于上述数据分析和实际操作的总结，提出测温谱线选择的原则：(1)高信噪比，基于现有试验工况和光谱采集设备，可以有效分辨原子谱线信号；(2)谱线相互独立，所选Ar谱线要求相互独立，没有发生互相干扰，同时要避免其他元素谱线的影响；(3)要求所选谱线具有较宽的高能级能量，基于Boltzmann画图测温法实现高灵敏度、精确的温度测量。

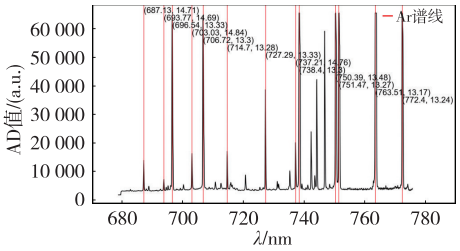
3　测试结果与分析

3.1　工艺第一阶段

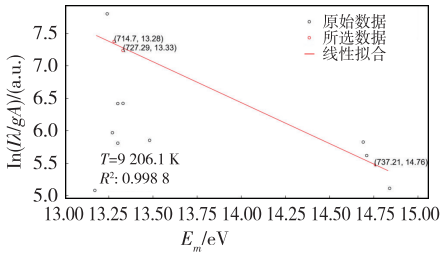
在POVD工艺的第一阶段，即预备阶段，感应等离子体发生器内是纯氩气环境。如图2由于当积分时间为1 ms时，拟合图右侧的四个点所对应的光谱谱线信噪比均小于10，所以这里采用5 ms的积分时间测量。按照之前提出的谱线选择原则选出的谱线记录在表3，利用表3中的谱线进行拟合测温得到图3，测温结果是9 206.1 K，谱线对应的点在拟合图中的拟合优度相关系数R^2是0.998 8，说明选中的三条谱线呈现了很好的线性。

表3　积分时间5 ms的第一阶段Ar谱线光谱参数

λ/nm	光谱AD值	信噪比	E_m/eV
714.70	17 039.6	10.00	13.28
727.29	38 597.4	22.64	13.33
737.21	20 118.6	11.84	14.76



(a) 等离子体发射光谱图



(b) Ar谱线Boltzmann拟合图

图3　积分时间为5 ms的第一阶段等离子体温度初步分析

为检验按照原则选择谱线的测温结果的一致性，还开展了利用不同积分时间下获得的光谱数据的测温工作。表4中记录了积分时间10 ms和15 ms的测温结果。

表4　优化谱线后的测温一致性检验

积分时间	5 ms	10 ms	15 ms
T/K	9 206.10	9 218.06	9 005.15
R^2	0.998 8	0.991 5	0.994 5

从表中的相关系数R^2可以说明选出的谱线对应的拟合点呈现出很好的线性，用这三次测温结

果的变异系数CV来表示测温结果的一致性。经过计算，筛选后的测温结果变异系数CV是1.07%，远远小于常规处理方法的20.74%，说明了谱线的筛选能很好地改善测温结果的一致性。最终第一阶段测温的结果取三次测温结果的平均值9 143.1 K。

3.2 工艺第二阶段

3.2.1 氩谱线分析

第二阶段是稳定阶段，此时等离子体发生器内有三种气体，氩气、氮气和氧气的比例是1∶20∶40。按照第一阶段的研究方法，针对第二阶段的Ar谱线进行了测温分析，筛选出的符合信噪比标准的谱线记录在表5。可以看到信噪比大于10谱线不具有较宽的高能级能量，导致最后的测温结果会有较大的偏差。

表5 积分时间15 ms的第二阶段Ar谱线光谱参数

λ/nm	光谱AD值	信噪比	E_m/eV
696.54	29 915.2	17.52	13.33
706.72	30 189.2	17.71	13.3
738.40	49 300.6	28.93	13.3
750.39	38 603.8	22.67	13.48
751.47	42 815.8	25.06	13.27
772.40	32 782.8	18.96	13.24

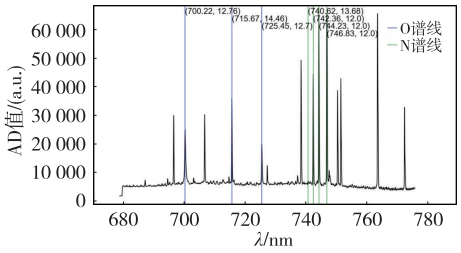
3.2.2 氮、氧谱线分析

针对Ar谱线分析中遇到的问题，在与第一阶段相同甚至更高的积分时间下，高能级能量较高的氩谱线的信噪比仍然偏低，可能是由于二阶段中氩气含量占比过低导致；同时由于氮气和氧气的加入，Ar谱线周围出现了新的谱线，也会破坏谱线独立的原则。所以实验考虑使用通过相同的筛选条件筛选出的其他元素谱线完成测温工作，表6是积分时间为15 ms下测量的680～780 nm范围内所有符合条件的氮氧谱线参数表[10]。

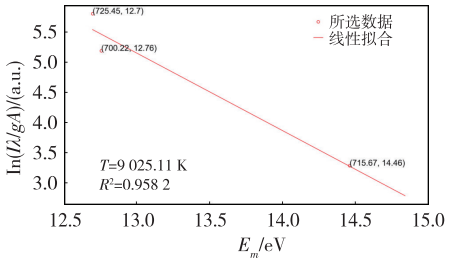
表6 积分时间15 ms的第二阶段氮、氧谱线光谱参数

气氛组成	λ/nm	光谱AD值	信噪比	E_m/eV
O谱线	700.22	24 909.6	14.66	12.76
	715.67	35 899	21.07	14.46
	725.45	19 786.6	11.55	12.70
N谱线	742.36	44 350.8	26.18	12.00

可以看到：三条O谱线都符合谱线筛选原则，而N谱线只有一条符合原则，所以最终选择氧元素谱线来完成第二阶段的测温工作，结果如图4。测温结果为9 025.11K，谱线对应的点在拟合图中的拟合优度相关系数R^2是0.958 2。



（a）等离子体发射光谱图



（b）O谱线Boltzmann拟合图

图4 积分时间为15 ms的第二阶段等离子体测温

为检验O谱线的测温结果的一致性，后续也开展了利用不同积分时间下获得的光谱数据的测温工作。表7中记录了积分时间为30 ms和50 ms的测温结果。

表7 O谱线的测温一致性检验

积分时间	15 ms	30 ms	50 ms
T/K	9 025.11	8 176.75	7 947.22
R^2	0.958 2	0.965 7	0.965 9

经过计算，筛选后的O谱线测温结果变异系数CV是5.53%，最终第二阶段测温的结果取三次测温结果的平均值8 383.03 K。

3.3 工艺第三阶段

第三阶段是反应阶段，由氩气作为载气，向等离子体发生器内带入原料$SiCl_4$。由于氩气的含量很低，所以继续沿用按照第二阶段的研究方法，针对第三阶段的O谱线进行了测温分析。

从图5可以看出第三阶段等离子体发射光谱图与第二阶段相比多出了很多条谱线，这是因为注入原料$SiCl_4$后为等离子体发生器中引入了硅元素和氯元素，同时原料$SiCl_4$会发生氧化反应，化学反应的过程中会产生各种离子和离子团，其中氧离子和含氧离子团的出现带来新的O谱线[11]。但是化学反应是快速进行的，无法掌控反应的过程，所以实验沿用第二阶段没有化学反应时的三条O谱线进行测温，得到的测温结果是6 153.89 K，谱线对应的

点在拟合图中的拟合优度相关系数R^2是0.988 5。

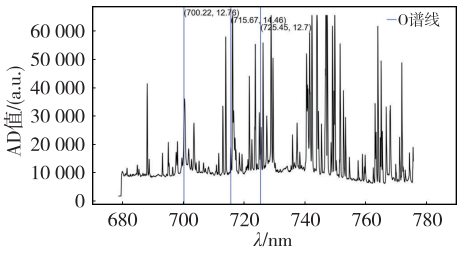


图5　积分时间为15 ms的第三阶段等离子体发射光谱图

为检验第三阶段测温结果的一致性，后续也开展了不同积分时间下的光谱测温工作。表8中记录了积分时间为20 ms和30 ms的测温结果。

表8　第三阶段测温一致性检验

积分时间	15 ms	20 ms	30 ms
T/K	6 153.89	5 872.02	5 942.31
R^2	0.988 5	1.000 0	1.000 0

经过计算，第三阶段测温结果变异系数CV是2.00%，最终第三阶段测温的结果取三次测温结果的平均值5 989.41 K。

3.4　等离子体温度的变化趋势

图6为光谱法测得的POVD工艺中不同阶段等离子体温度的变化趋势。可以看到等离子体的温度整体呈下降趋势，这是因为第一阶段和第二阶段之间向等离子体发生器内大量氧气和氮气的充入导致反应器内的气体热容显著增加，从而吸收了部分等离子体的热量，使得反应器内的温度出现小幅下降；而第三阶段等离子体反应器内发生了制备SiO_2的氧化还原反应，需要吸收大量能量来驱动，导致反应器内的温度有较大幅度的下降。

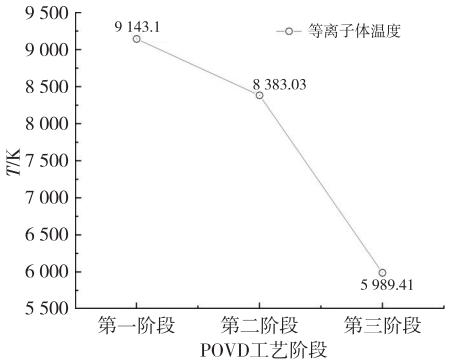


图6　等离子体温度变化趋势

综上所述，本节测温结果的变化趋势与POVD工艺过程的阶段相吻合，这进一步证明了测温结果的准确性和可靠性。

4　结论

本文采用非接触式的发射光谱诊断技术，对光纤预制棒POVD工艺中各阶段的高温等离子流进行了温度诊断。针对预备阶段、稳定阶段和反应阶段，提出了等离子体发射谱线的筛选原则。在不同阶段，根据光谱数据选择符合原则的谱线完成测温。结果表明，使用经过筛选的谱线进行测温，相较于之前的方法，在变异系数和拟合度方面均得到了显著改善。这证明了所提出的谱线筛选原则能够有效解决等离子体测温领域中拟合度差和一致性差的两大问题。此外，该方法还为光纤预制棒POVD工艺的温度控制提供了更为准确的理论支持，有助于提升工艺的稳定性和产品质量。

参考文献：

[1] 张　岩，高　嵩，薛耀辉，等. 石英光纤强度的影响因素研究及工艺改进[J]. 光子学报，2022，51(6)：183-192.
Zhang Yan，Gao Song，Xue Yaohui，et al. Research on factors of affecting the strength of silica optical fiber and process improvement[J]. Acta Photonica Sinica，2022，51(6)：183-192.

[2] Berthou H，Neumann V，Hintermann H E. High frequency，inductively coupled plasma torch for pure and doped silica deposition[J]. Surface and Coatings Technology，1993，61(1/3)：164-170.

[3] 江　南. 我国低温等离子体研究进展(Ⅰ)[J]. 物理，2006，35(2)：130-139.
Jiang Nan. Low temperature plasma research in China(Ⅰ)[J]. Physics，2006，35(2)：130-139.

[4] 葛国伟，陈里昂，程　显，等. 真空断路器弧后等离子体探针诊断系统[J]. 真空科学与技术学报，2023，43(1)：51-59.
Ge Guowei，Chen Li'ang，Cheng Xian，et al. Probe diagnostic of post-arc plasma system for vacuum circuit breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology，2023，43(1)：51-59.

[5] 孙秀云，周学铁，李　燕，等. 发射光谱Boltzmann法测量毛细管放电产生的电热高密度等离子体温度之误差分析[J]. 光谱学与光谱分析，2003，23(3)：563-565.
Sun Xiuyun，Zhou Xuetie，Li Yan，et al. Error analysis of temperature measurement by Boltzmann plot in atomic emission spectroscopy for a high-density plasma produced by electrothermal capillary discharge [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2003，23(3)：563-565.

[6] 喻明浩，吕　博，邱泽洋，等. 纳米钼粉制备用高频感应等离子体装置的设计与优化[J]. 机械设计，2023，40(11)：99-105.
Yu Minghao，Lyu Bo，Qiu Zeyang，et al. Design and

optimization of high-frequency inductive plasma device for preparation of molybdenum nanopowder [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(11): 99-105.

[7] 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.
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.

[8] 王 泽, 于晓英, 宋梦杰. 发射光谱法测量城轨弓网电弧等离子体温度[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(4): 50-53.
Wang Ze, Yu Xiaoying, Song Mengjie. Study on the temperature of the arc plasma of an urban rail pantograph by emission spectroscopy [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2023, 59(4): 50-53.

[9] 曾 徽, 欧东斌. 基于Ar发射光谱的感应等离子体球化高温流场温度测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1685-1689.
Zeng Hui, Ou Dongbin. Temperature measurements of inductively coupled plasma spheroidization by using argon emission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1685-1689.

[10] 孙元成, 宋学富, 杜秀蓉, 等. 常压高频等离子体电子温度的光谱法诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 368-373.
Sun Yuancheng, Song Xuefu, Du Xiurong, et al. Spectroscopic diagnosis of atmosphere high frequency air plasma electron temperature [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(2): 368-373.

[11] Baeva M, Uhrlandt D. Magnetohydrodynamic modeling for an OVD reactor setup[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24): 4044-4050.

作者简介：

程兆裕(2000—)，男，陕西省西安市人，硕士研究生，主要研究方向为等离子体诊断；

沈海平(1981—)，男，浙江省平湖市人，副教授，主要研究方向为光辐射测试和照明应用。