



# 等离子体应用解决方案

精准检测等离子体 驱动尖端制造

半导体/材料制备/航空航天/激光加工/环境监测与矿产科学



口袋光谱世界

ASIA 400-623-2690  
asiamkt@oceanoptics.com  
www.oceanoptics.cn

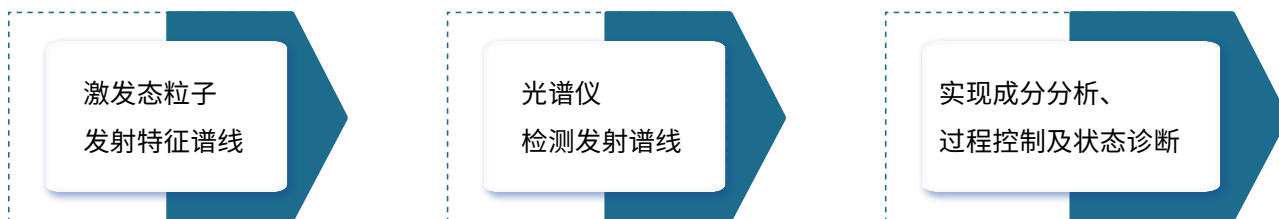
We Measure What Matters

# 背景简介

等离子体是由丰富的离子、电子、自由基等极活泼的反应性物质组成的集合体。半导体、材料制备、航空航天、环境、化学合成等诸多领域引入等离子体技术，促成了一系列工艺革新和巨大的技术进步。

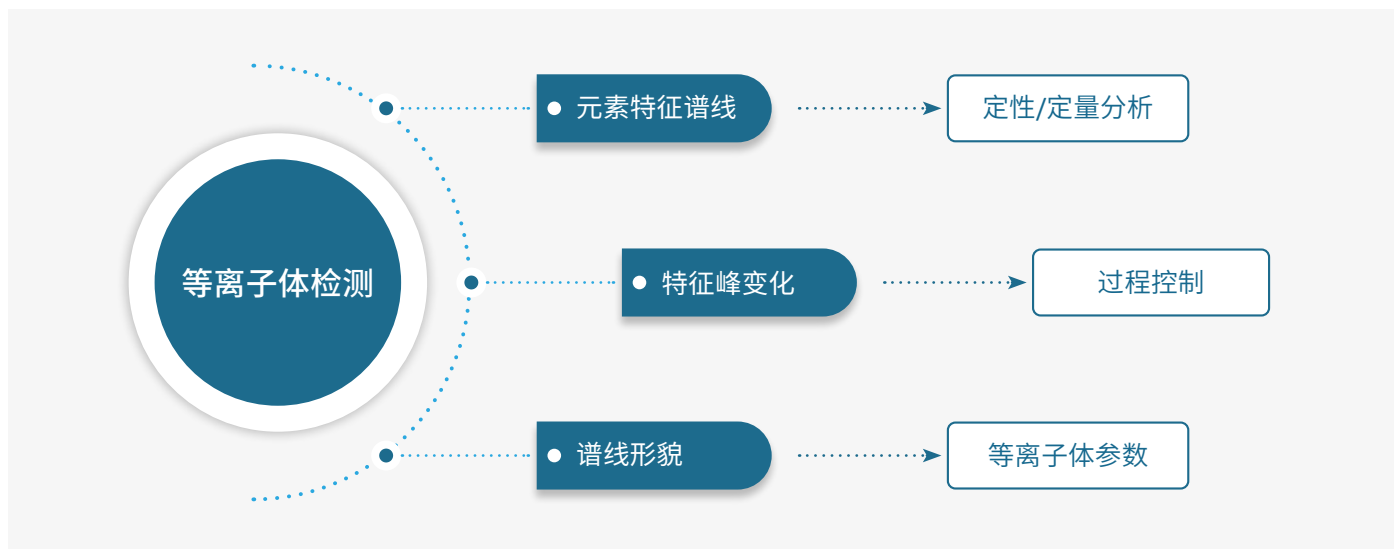
等离子体检测技术能够对样品进行元素分析，并确定等离子体生成过程中的关键工艺参数。通过检测特征发射谱线，可以分析等离子体中的元素组成，同时利用发射线强度和展宽实现电子温度和密度的实时监测。在实际应用中，气体组分、等离子体温度以及颗粒密度等关键参数的调控至关重要，对等离子体状态的实时监测与精确控制，将直接提升工艺稳定性和产品性能。

## 等离子体检测核心原理



## 等离子体检测关键参数及技术要点

等离子体检测基于灵活的模块化光谱仪配置，可实时获取其发射光谱，并通过OceanView软件得到对应的光谱数据。



# 等离子体检测 光纤光谱仪系列产品



## ST系列微型光谱仪

超小体积，无缝集成

- 业界领先的微型化设计
- 标配OceanDirect软件开发包



## HR系列高分辨率光谱仪

亚纳米级分辨率，明察秋毫

- 光学分辨率可达0.06 nm，避免谱线重叠
- 出色的热稳定性和杂散光性能
- 支持HSAM、多种触发模式和OceanDirect软件开发包



## QE Pro系列高灵敏度光谱仪

微弱信号，精准捕获

- 超高灵敏度，精准捕获弱光信号
- 采用背照式CCD探测器，量子效率高达90%以上
- 大容量缓存，板载缓存最高可达15,000张谱图



## FX系列高速光谱仪

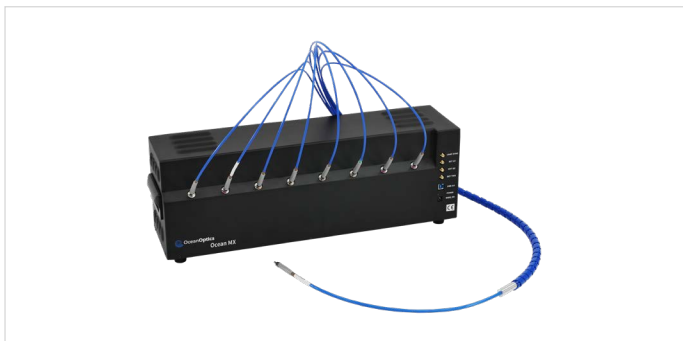
微秒响应，动态追踪

- 超高速采集，速率可达最高4500次扫描/s
- 超高容量缓存，板载缓存最高可达50,000张谱图
- 多通讯接口，千兆以太网、Wi-Fi、USB模式，支持危险环境的远程监控

光谱仪参数				
	ST	HR	QE Pro	FX
光谱范围	185-1085 nm	190-1100 nm	190-1100 nm	200-1025 nm
积分时间	3.8 ms-6 s	1 $\mu$ s-2 s	8 ms-60 min	0.01 ms-10 s
光学分辨率 (FWHM)	2.2 nm	0.08-7.12 nm	1.2-6.87 nm	0.80-1.33 nm
信噪比 (单次扫描@10ms)	190:1	380:1	1,000:1	290:1
信噪比 (板载平均模式)	2,250:1	25,800:1	NA	NA
接口	SMA 905	SMA, TFM-108-02-L-DH Samtec, USB Type-C	SMA 905	SMA 905, Gigabit Ethernet, USB
尺寸 (mm)	42.1 x 40.3 x 26.6	148.8 x 106.4 x 48.2	182 x 110 x 47	88.9 x 63.5 x 52.4

\*以上数据为系列产品部分型号的参数。

\*规格如有变动，恕不另行通知。更多详情，请联系当地销售代表。



## Ocean MX多通道光谱仪

### 激光诱导击穿光谱仪

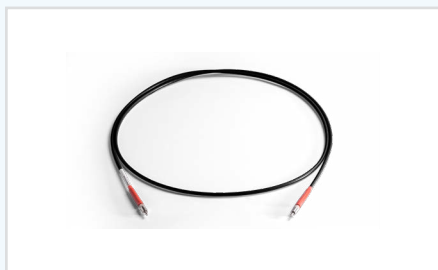
- 可集成8个通道，自由配置分辨率和波长范围
- 硬件级同步设计，确保各通道工作统一
- 内建可编程时序模块，高精度控制外部设备工作时序
- 独立控制电源，USB3.0通讯接口
- 已通过CE认证，符合欧盟相关法规要求

Ocean MX多通道光谱仪参数			
光谱范围	~180-1100 nm (选配)	信噪比 (单次扫描)	380:1
A/D位数	16 bits	光学分辨率	~0.1nm FWHM (根据配置)
探测器	线阵CCD (可选面阵CCD)	扫描速率	500 HZ
积分时间	1 us-2 s	触发延迟范围	-450 us to 450 us
数据接口	USB 3.0	调节步长	13.8 ns
操作系统	Windows 7/8/10/11 32bit or 64bit	触发抖动	20-30 ns
通道数量	1~8通道可选	触发电平	TTL; < 5.5 V
尺寸	585 mm*165 mm*210 mm (8通道)	功率	5 V-5 A
	345 mm*165 mm*210 mm (4通道)	重量	12 kg (8通道) ; 6.5 kg (4通道)

\* 参数为标配, 可以依据用户需求进行调整。

\* 以上数据为单通道采集速率。

\* 规格如有变动, 恕不另行通知。欲知详情, 请联系当地销售代表。



### QP系列抗紫外老化光纤

采用特殊高羟基石英材质，具备优异的紫外波段抗老化特性，保证等离子体发射光谱中紫外波段的信号不会对光纤本身造成不可逆的破坏。



### CC-3余弦校正器

集成Spectralon散射材料与耐高温不锈钢防护结构，覆盖200-2500 nm宽光谱范围。其180°超大接收角与抗紫外涂层设计，有效应对等离子体发光的方向性差异，匀化信号。

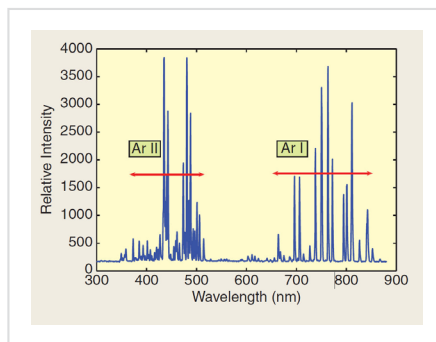


### OceanView 光谱分析软件

支持Windows, Mac OS 和Linux系统，内置大量应用向导，大幅提升科研与工业场景下的检测效率与数据可靠性。

## 等离子体推进火箭发动机的温度估算

在等离子体推进火箭（VASIMR）中，氩等离子体产生的高温会加热石英管，威胁邻近超导磁体。传统热电偶因电磁干扰、物理遮挡冷却系统而无法使用。光学发射光谱通过非接触式测量等离子体发光，成为可行的实时温度监测手段。本案例采用海洋光学S2000光谱仪（现已升级为SR4）采集等离子体发射光谱，结合光谱特征与温度分布的物理关联，进而间接估计管壁的温度分布。



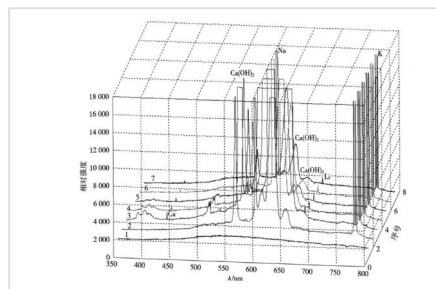
VASIMR发动机中氩等离子体的发射光谱图显示中性氩原子（Ar I）与氩离子（Ar II）的特征谱线，光谱数据经主成分分析（PCA）和建模后，实现无热电偶条件下的温度监测。

## 典型应用场景

- 等离子体推进火箭发动机温度监测
- 液体火箭发动机羽焰光谱实时诊断

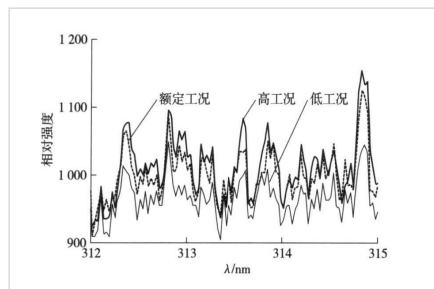
## 液体火箭发动机羽焰UV-VIS光谱的实时采集与故障诊断

液体火箭发动机工作时，高温高压燃烧产生的羽焰是一种典型的等离子体，含有金属离子、自由基（如OH基）等激发态粒子。通过海洋光学HR4000光谱仪（现已升级为HR4）采集羽焰的UV-VIS光谱，分析等离子体成分、温度及发动机工况，进而实现故障诊断（如金属磨损监测）。



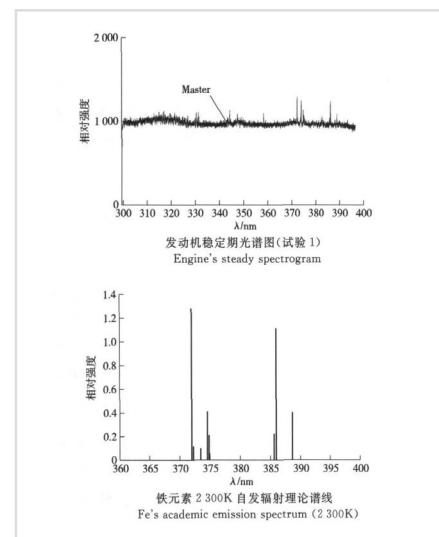
羽焰等离子体光谱图

在可见光波段（422-766 nm）检测到Ca、Ca(OH)<sub>2</sub>、Na、Li、K等特征峰，反映燃料杂质、发动机材料腐蚀或燃烧不稳定等问题，为故障诊断提供了多维度依据。



不同工况OH基波段的光谱均值图

液氢、液氧的加注比k值，不同工况对应不同的值，通过检测羽焰光谱OH基波段的变化，分析发动机在何种工况工作（高、低或额定工况），判断工作是否正常。



试验特征谱与Fe元素特征辐射理论谱线对比图

在紫外波段（370-390 nm）检测到Fe元素的5条特征谱线，判定发动机内部是否出现铁的磨损，实现早期预警。

\* S2000和HR4000光谱仪现有性能更优的替代型号可供选择，详情咨询海洋光学销售工程师

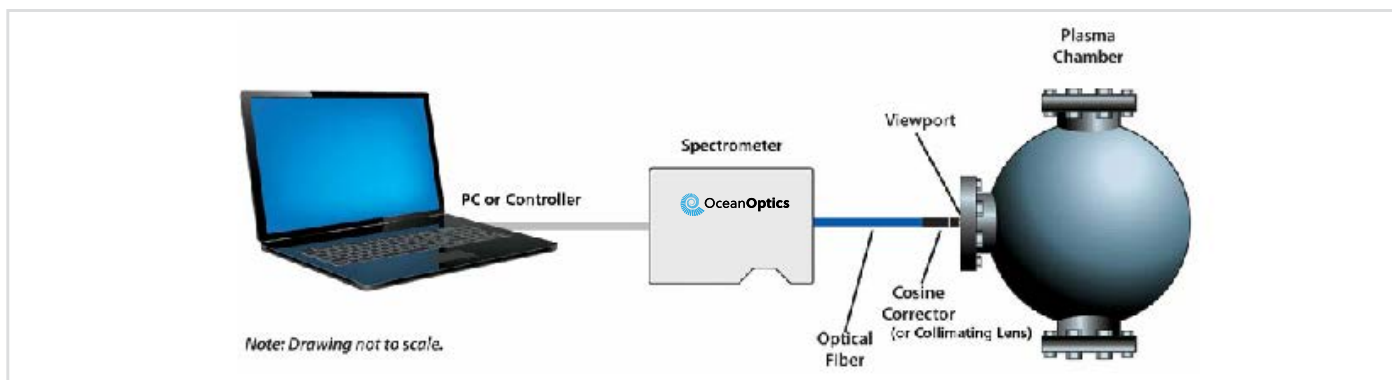
## 参考文献：

1. S. Lynn, et al. Temperature estimation for a plasma-propelled rocket engine [Applications of control], IEEE Control Systems Magazine, doi: 10.1109/mcs.2009.934407
2. 黄庆梅等，液体火箭发动机羽焰UV-VIS 光谱的实时采集及分析，北京理工大学学报第28卷第4期（2008）

## 典型应用场景

- 刻蚀终点检测
- 沉积过程监测
- 等离子体温度监测
- 腔室清洁过程监测

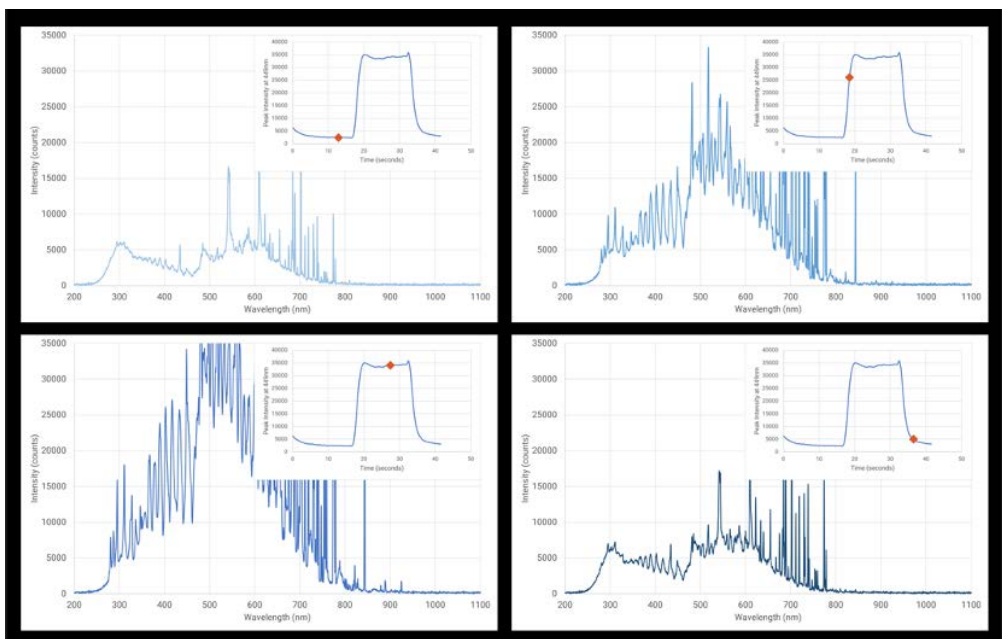
半导体工业中，我们通过各种尖端技术制造芯片，其生产过程非常精密和复杂，等离子体的操作和控制也归于其中。等离子体存在的过程中会连续不断对外辐射能量，这种能量通常会以光的形式存在，分析等离子体光谱可用于反推等离子体成分，进而实现对反应过程的监控和控制。



模块化光谱仪在真空腔内实时监测等离子体装置示意图

## 刻蚀终点检测

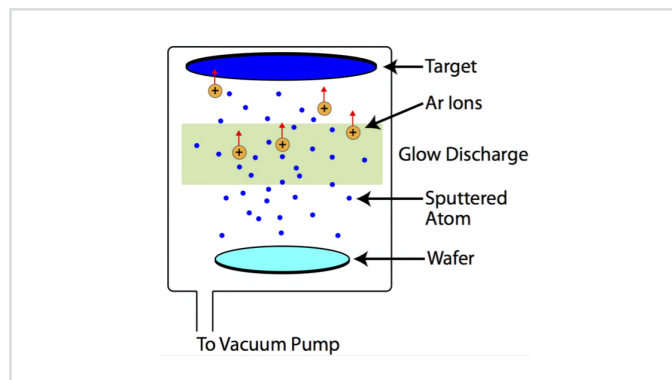
以 $CF_4/O_2$ 等离子体刻蚀 $SiO_2$ 为例， $SiO_2$ 被刻蚀完后，暴露的基底不再是富含氧的 $SiO_2$ ，而是Si或金属层，这些材料不会释放反应副产物 $O_2$ ，导致等离子体中总的氧气浓度急剧下降，通过海洋光学HR4光谱仪监测 $O_2$ 在400-600 nm波长范围内发射谱线的强度来监测氧的浓度， $O_2$ 在400-600 nm 区间谱线强度骤降时，谱线强度时间曲线出现“拐点”，即为刻蚀终点。



$O_2$  谱线强度随刻蚀时间的变化曲线

## 沉积过程监测

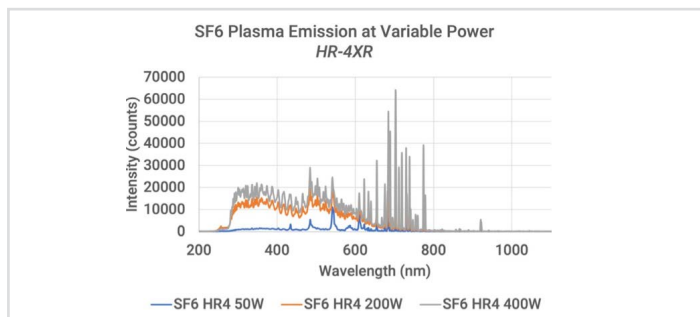
以氩等离子体溅射金属进行PVD沉积为例，氩气在高电压下电离形成等离子体，氩离子 ( $Ar^+$ ) 轰击金属靶材，导致靶材表面溅射出金属原子，这些原子定向沉积在晶圆表面形成薄膜，通过海洋光学HR4光谱仪实时监测氩等离子体发射光谱强度，关联金属溅射速率，实现薄膜厚度的精准控制。



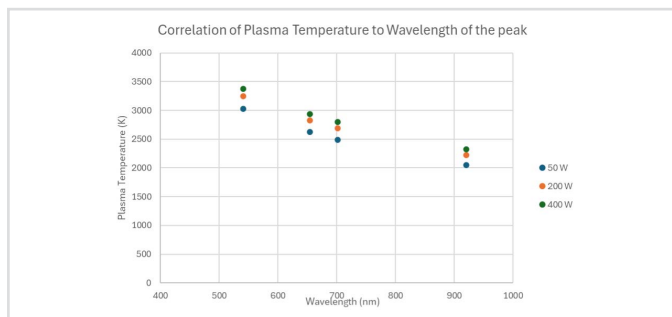
PVD溅射腔室示意图

## 等离子体温度监测

海洋光学HR4光谱仪实时采集腔体里的等离子体发射谱线（以六氟化硫 ( $SF_6$ ) 为例），建立谱线强度与射频功率之间的关系模型，利用Stefan-Boltzmann公式换算出等离子体温度。



$SF_6$ 等离子体在不同功率下的发射谱图



$SF_6$ 等离子体温度与发射峰波长的关系图

## 腔室清洁过程监测

在刻蚀和沉积过程中，等离子体腔室内部可能会积累一些残留物，需要对腔室进行清洁。使用氟基等离子体（如  $CF_4+O_2$ ）可以有效地完成清洁。通过海洋光学HR4光谱仪监测  $O_2$  与  $CF_4$  发射谱线的强度比来监测清洁程度。监测到较高的氧氟比（O:F），意味着工艺后腔体内氧气浓度相对氟更高，说明氟残留物已被高效清除。



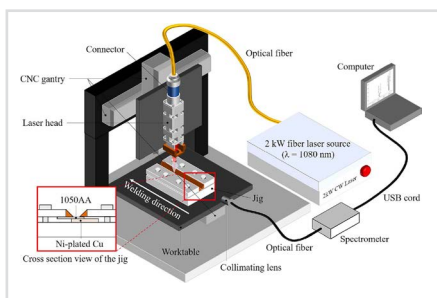
O:F比随时间变化的曲线

## 典型应用场景

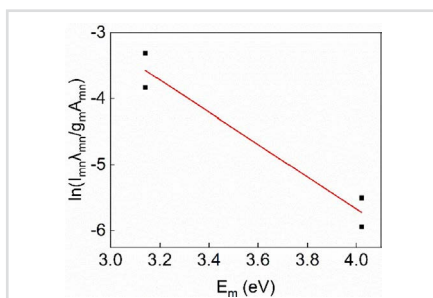
- 电子温度检测
- 电子密度检测
- 激光焊接熔深监测
- 等离子体强度监测

## 对Al/Cu异种激光焊接工艺进行原位监测

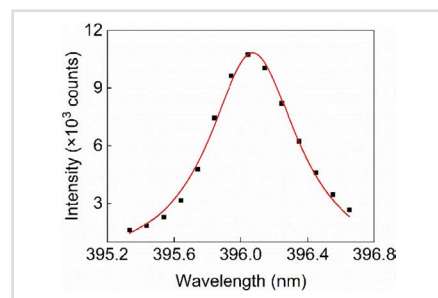
Al/Cu异种激光焊接工艺已成为新能源汽车锂离子电池制造的关键技术。然而，由于缺乏针对该过程的原位监测技术，降低了其效率并增加了电池系统的潜在风险。本案例采用海洋光学HR2000+光谱仪（现已升级为HR4）对激光诱导等离子体（LIP）进行监测。通过检测发射线强度、电子温度、电子密度等等离子体参数有效诊断焊接状态（未焊接、临界焊接或铜熔焊）。



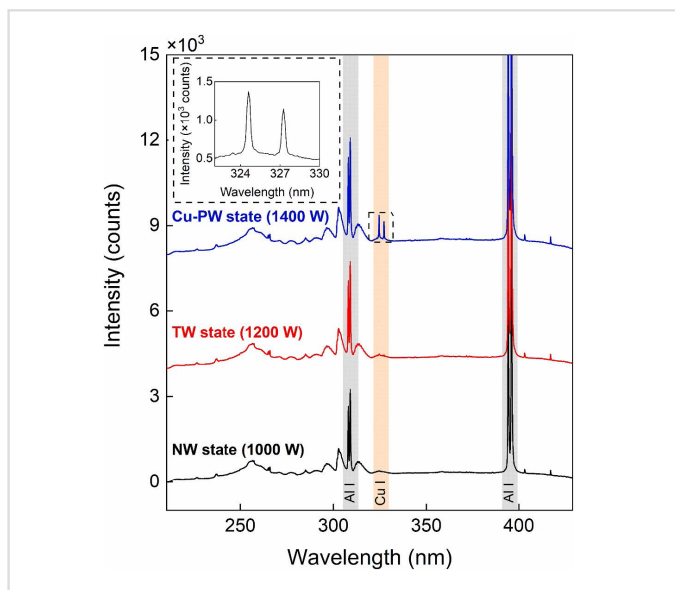
光纤光谱仪监测激光异种焊接示意图



Boltzmann图法（通过多条Al I谱线强度构建）测定等离子体的电子温度 $T_e$

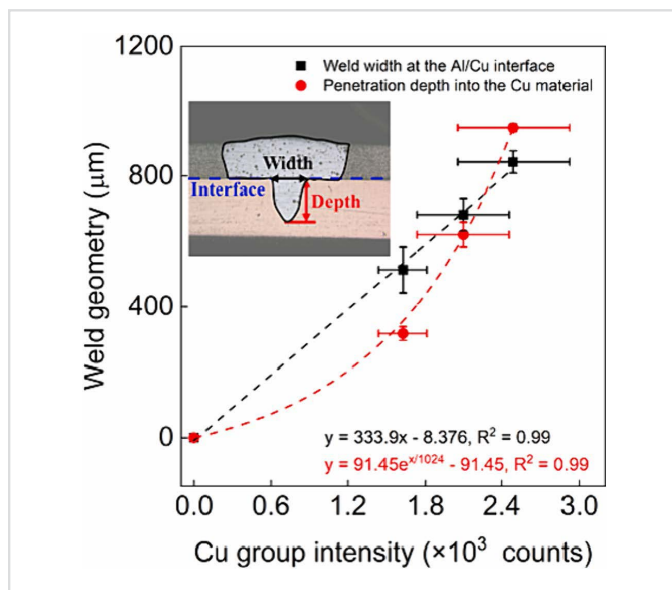


对Al I 396.15 nm谱线的斯塔克展宽进行洛伦兹拟合，测定电子密度

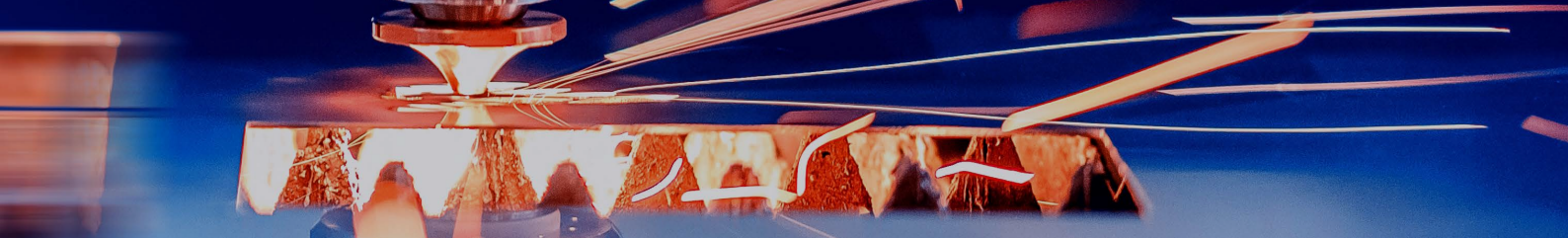


三类焊接状态下的光谱对比图（NW、TW和Cu-pw）

在Cu-pw状态下，Cu谱线自蚀消失（左上角是放大的Cu I发射谱线），表明Cu已被充分熔化和穿透。

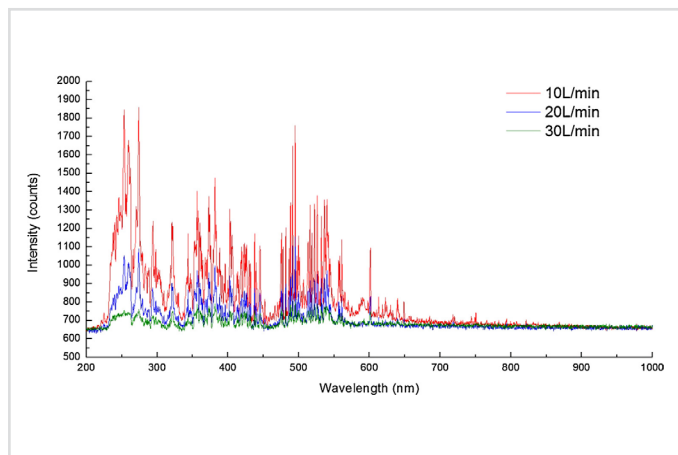


Cu I发射谱线强度与焊缝宽度（线性）及熔深（指数）的拟合曲线（ $R^2=0.99$ ）

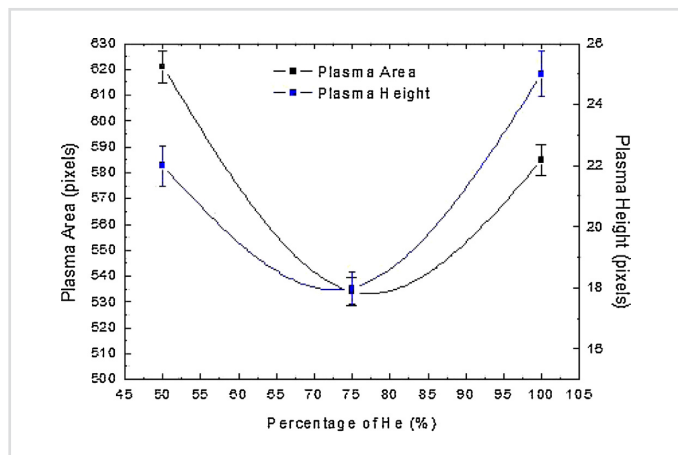


## CO<sub>2</sub>激光焊接中采用小直径侧吹喷嘴对等离子体行为的调控研究

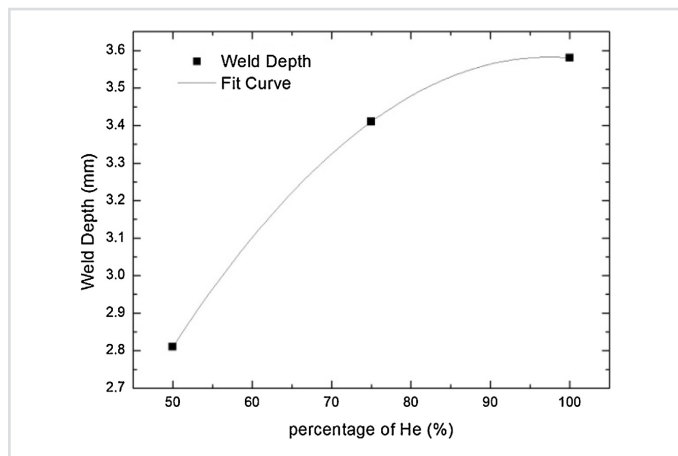
本案例采用海洋光学HR 4000光谱仪(现已升级为HR4)采集CO<sub>2</sub>激光焊接诱导等离子体的发射光谱, 定量分析不同工艺参数(气体流量、成分、喷嘴位置)对等离子体强度、稳定性和激光能量吸收的影响。



不同气体流量下的光谱图



不同保护气体成分(He-Ar配比)下的等离子体强度图



不同保护气体成分(He-Ar配比)对激光焊接熔深影响图

\* HR2000+和HR4000光谱仪现有性能更优的替代型号可供选择, 详情咨询海洋光学销售工程师

### 参考文献:

1. SeungGu Kang, et al. In-situ monitoring of Al/Cu dissimilar laser welding process using optical emission spectroscopy (OES), Optics and Laser Technology 176 (2024)110893
2. Yong Zhao, et al. Plasma behavior and control with small diameter assisting gas nozzle during CO<sub>2</sub> laser welding, Journal of Materials Processing Technology 237(2016)208-215

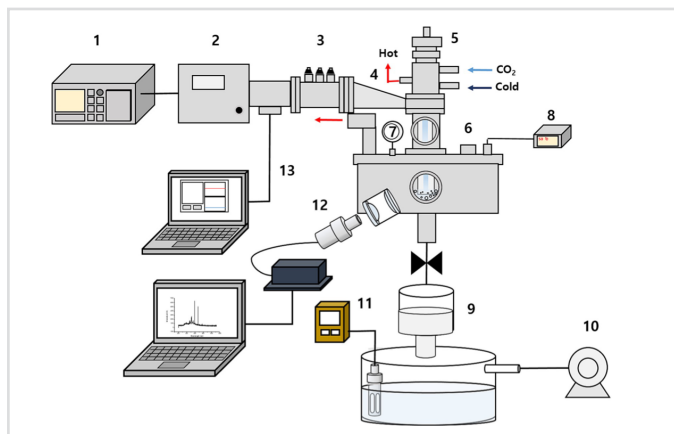
## 典型应用场景

- 锂矿检测
- 土壤重金属检测
- 水体重金属检测

## 二氧化碳微波等离子体回收锂

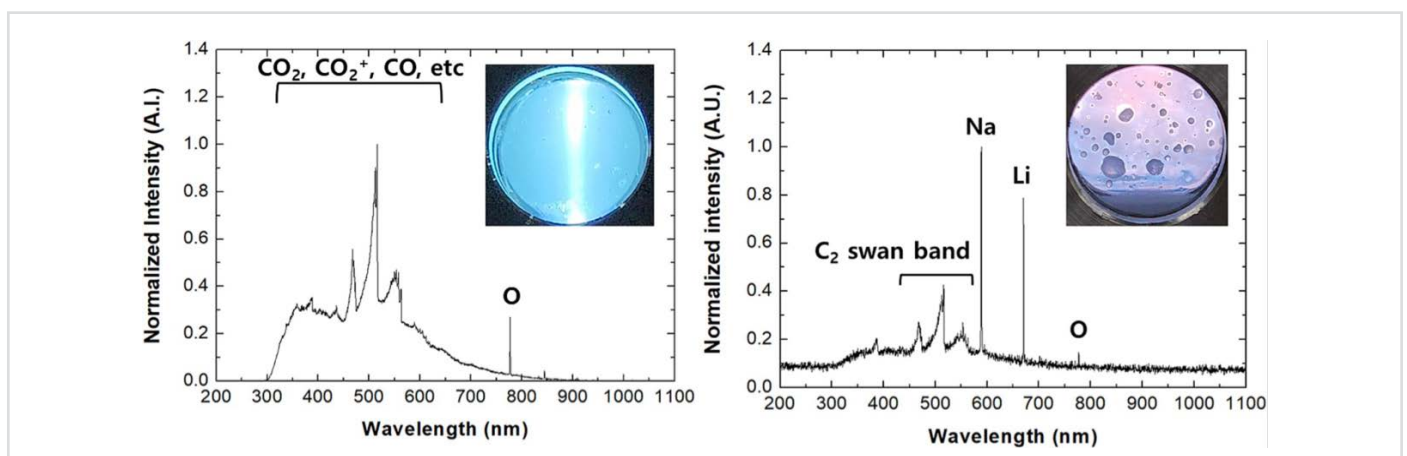
锂作为锂离子电池（LIBs）和二次电池的关键材料，其需求随着电动汽车和消费电子市场的迅速扩张而急剧增长。约60%以上锂资源以盐湖卤水形式存在，传统从盐湖或海水中回收锂的方法（沉淀、萃取、吸附等）往往效率低、成本高、流程长。

以新型高效、低能耗、环境友好的CO<sub>2</sub>微波等离子体提锂技术为例，CO<sub>2</sub>微波等离子体直接与含锂水溶液反应，生成碳酸锂（Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>）沉淀，可实现高效提锂。利用海洋光学HR4000光谱仪（现已升级为HR4）对CO<sub>2</sub>微波等离子体进行原位检测，通过分析等离子体中存在的活性物种（如CO、O、C<sub>2</sub>等）和等离子体温度，探究等离子体在锂回收反应中的作用机制，未来可通过在线监测光谱特征，实时优化等离子体工艺参数（功率、反应时间等），进一步提高锂的回收率。



## 实验装置系统

包含微波等离子体发生器、回收锂的等离子体—水溶液反应器、等离子体检测系统及碳酸锂产物的收集采样装置。



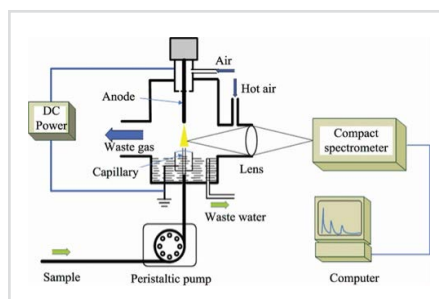
CO<sub>2</sub>微波等离子体在(a)火炬区和(b)溶液区的光学发射光谱

在200–1100 nm波段，清晰地识别出CO<sub>2</sub><sup>+</sup>、CO、O、C<sub>2</sub>等高活性物质以及来自溶液的Na、Li原子谱线。这些活性粒子在等离子体—溶液界面上迅速解离、电离并生成OH<sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>，直接驱动Li<sup>+</sup>向Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的碳酸盐矿化反应。基于C<sub>2</sub>Swan带拟合获得的等离子体温度（火炬区约2000K，溶液区约1440K）为碳酸盐化反应提供了额外的能量来源。上述结果从高活性物质生成和温度效应两个维度，为CO<sub>2</sub>微波等离子体提升锂回收效率提供了理论依据。

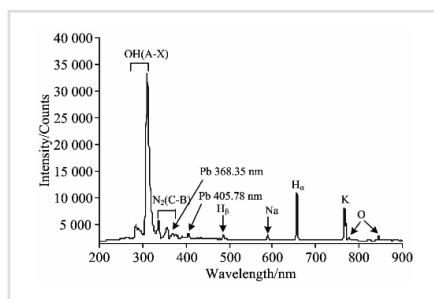


## 重金属检测

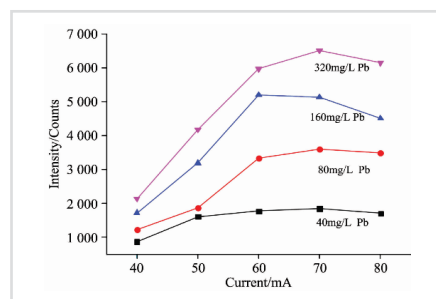
光纤光谱仪可进行多元素同时检测，无需雾化器，适合现场或实验室小型化检测，特别适用于水体/土壤重金属元素（如Cd, Cu, Pb, Cr, Zn、Na等）的快速、低成本、在线检测。以大气压液体阴极辉光放电发射光谱（ELCAD-AES）检测水体中的铅为例，样品通过大气压液体阴极辉光放电产生等离子体，通过海洋光学Maya2000光谱仪（现已升级为HR6）分析等离子体的原子发射光谱，定量检测Pb浓度。



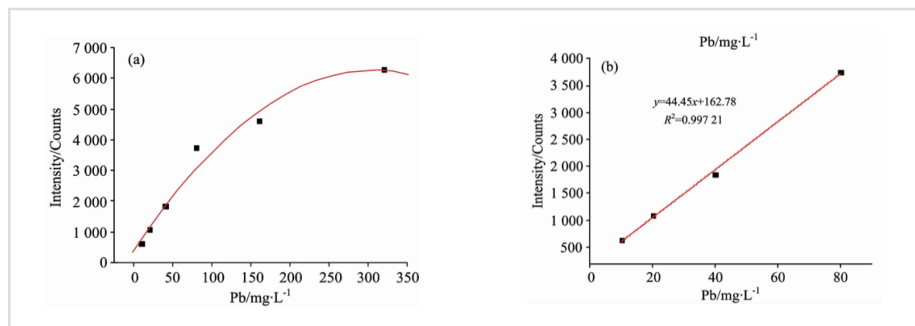
ELCAD-AES装置示意图



硝酸铅溶液的发射光谱图



放电电流对Pb发射强度的影响



不同浓度的Pb与光谱信号强度的拟合曲线

(a) 10-320 mg/L，离子浓度较高时，有自吸现象；(b) 10-80 mg/L

\* Maya2000和HR4000光谱仪现有性能更优的替代型号可供选择, 详情咨询海洋光学销售工程师

## 参考文献:

1. 郑培超等, 大气压液体阴极辉光放电发射光谱检测水体中的铅, 光谱学与光谱分析第35卷第7期 (2015)
2. J.K. Yang, et al. Novel approach for recovering lithium from simulated aqueous solutions using carbon dioxide microwave plasma, Desalination 567 (2023) 116978

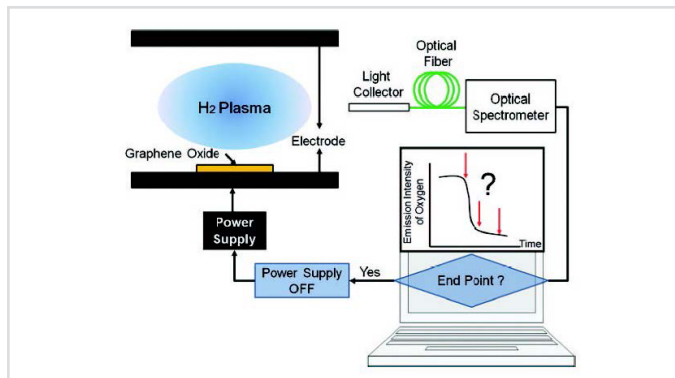
# 行业应用案例材料制备

## 等离子体还原氧化石墨烯终点判定

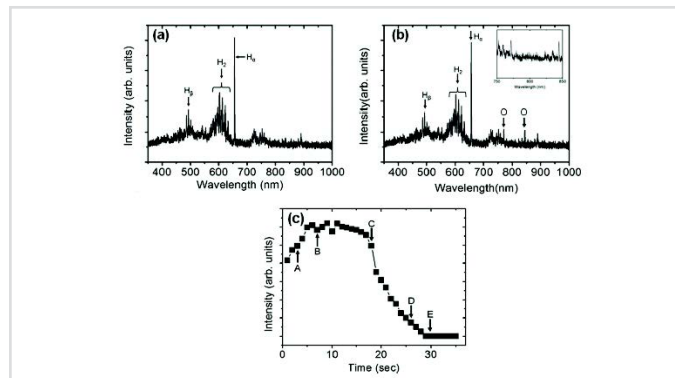
氧化石墨烯 (GO) 需通过还原恢复导电性, 等离子体还原法高效、可控, 但过度还原会破坏石墨烯结构、降低电学性能, 因此需实时监测还原终点。本案例采用海洋光学USB4000 (现升级为SR4) 光谱仪, 通过实时监测等离子体发射光谱强度来确定还原过程的最佳终止时刻。

### 典型应用场景

- 等离子体还原氧化石墨烯终点判定
- 碳纳米材料生长机制研究及过程监控



GO还原过程光学发射光谱示意图

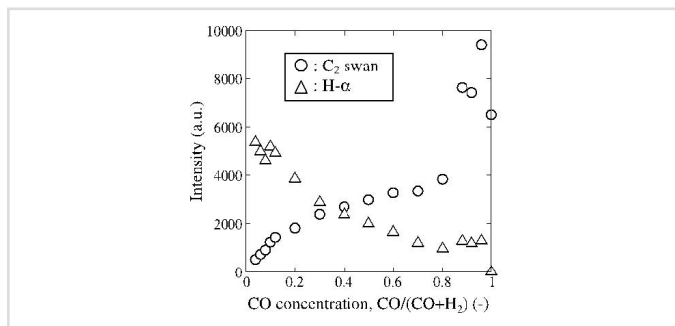


GO还原过程发射光谱图

当氧的发射光谱出现下降趋势 (即C点时) 为还原过程最佳终止时刻。

## 碳纳米材料生长机制研究及过程监控

碳纳米材料应用前景广阔, 但其规模化制备仍是研究重点。本案例利用海洋光学HR4000光谱仪 (现已升级为HR4) 在线监测等离子体发射光谱C<sub>2</sub>Swan带和H-α线的变化, 反映碳纳米管的生长状态, 通过调节CO/H<sub>2</sub>比例, 优化工艺参数, 精准调控碳纳米管结构。



分析CO浓度 (CO/(CO+H<sub>2</sub>)) 变化时的等离子体发射光谱

获得了C<sub>2</sub>Swan与H-α发射线的强度变化, 当CO浓度大于0.8时, C<sub>2</sub>发射强度急剧上升, 表明碳纳米管生长加速。

\* USB 4000/HR4000光谱仪现有性能更优的替代型号可供选择, 详情咨询海洋光学销售工程师



电话: 400-623-2690

邮箱: [asiamkt@oceanoptics.com](mailto:asiamkt@oceanoptics.com)

官网: [www.oceanoptics.cn](http://www.oceanoptics.cn)

地址: 上海市闵行区元科路155号16幢三层A座



口袋光谱世界