

## 教学微等离子体原子发射光谱仪在创新实验教学中的应用

邓羽蓉<sup>1,\*</sup>, 杨嘉慧<sup>2</sup>, 张金懿<sup>1</sup>, 郑成斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 四川大学化学学院, 成都 610064

<sup>2</sup> 四川大学分析测试中心, 成都 610064

**摘要:** 介绍了模块化的教学微等离子体原子发射光谱仪的设计理念及其仪器基本构造, 并以此光谱仪为例, 示范教学改革策略。自搭建仪器实验教学模式通过让学生设计和构建仪器, 深化原理理解, 提升动手和创新能力。结合3D打印和人工智能技术, 提高教学效率, 掌握先进技术的应用能力。模块化教学方法鼓励学生根据兴趣选择内容, 支持个性化学习, 培养综合分析能力和创造性思维。

**关键词:** 仪器分析实验; 教学微等离子体原子发射光谱仪; 自搭建仪器; 创新创造

**中图分类号:** G64; O6

## Application of the Teaching Microplasma Atomic Emission Spectrometer in Innovative Experimental Teaching

Yurong Deng<sup>1,\*</sup>, Jiahui Yang<sup>2</sup>, Jinyi Zhang<sup>1</sup>, Chengbin Zheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China.

<sup>2</sup> Analytical and Testing Center of Sichuan University, Chengdu 610064, China.

**Abstract:** This paper introduces the design concept and basic structure of the modular teaching microplasma atomic emission spectrometer, using it as an example to demonstrate teaching reform strategies. The self-constructed device experimental teaching model enhances students' understanding of fundamental principles while improving their hands-on skills and innovative abilities. By incorporating 3D printing and AI technologies, the approach aims to enhance teaching efficiency and equip students with the skills to apply advanced technologies. The modular teaching method allows students to choose study content based on their interests, supporting personalized learning experiences and fostering comprehensive analytical abilities and creative thinking.

**Key Words:** Instrumental analysis experiment; Teaching microplasma atomic emission spectrometer; Self-constructed device; Innovation and creativity

在教育革新的大潮中, 仪器分析作为一门重要的专业基础课程, 其教学方法和实践应用正面临着重大的改革需求<sup>[1-7]</sup>。面对传统教学模式的局限, 如学生往往只能通过有限地接触大型分析仪器来获得实践经验, 对仪器操作理解浅薄、理论与实践脱节等问题, 限制了他们对仪器结构和原理的深入理解, 也难以满足个性化和创新能力培养的要求。

自搭建仪器分析实验作为一种创新的教学模式, 为解决上述问题提供了一种有效途径。它允许学生从零开始设计和构建仪器, 这一过程不仅加深了学生对仪器工作原理的理解, 也锻炼了他们的

动手能力和创新思维。通过自搭建仪器，学生能够更直观地看到理论知识在实际中的应用，从而激发他们对科学探究的兴趣。模块化教学是另一个重要的教学创新点。通过将仪器分析的各个环节拆分为独立的模块，学生可以根据自己的兴趣和需求选择学习内容。这种模块化设计可以有效帮助学生构建一个系统化的知识体系，同时培养他们的综合分析能力和创新思维，充分体现了个性化定制教育的理念。在自搭建仪器的基础上，学生可以根据个人的学习目标和职业规划，设计个性化的实验方案，实现自我驱动的学习过程。这种教育模式有助于激发学生的学习热情，培养他们的独立思考和创新能力。

结合人工智能和3D打印技术，教学模式得以进一步创新。3D打印技术使得学生能够快速将设计转化为实体模型，而人工智能技术则在数据分析和实验结果处理方面提供了强大的支持。这些前沿技术的融合，不仅提升了实验教学的效率，也为学生的个性化学习提供了广阔的可能性。

本文以自搭建教学微等离子体原子发射光谱仪为例，介绍了仪器的设计理念及基本构造，旨在为仪器分析教学改革提供一种新的思路和方法，以期在提升教学质量的同时，为社会培养出更多具有创新精神和实践能力的高素质人才。通过这种教育模式的实施，能够为学生的个性化发展和数字化能力的提升奠定坚实的基础。

## 1 教学微等离子体原子发射光谱仪设计理念

原子发射光谱是一种基于化学元素的(气态)原子或离子受激发后发射出的特征发射谱线的波长和强度来分析待测目标物中的元素组成及含量。它具有选择性好、灵敏度高、抗干扰能力强、受元素价态和形态干扰小以及普适性强等诸多优点，能够对约70种元素进行分析，被誉为元素检测的金标准。传统的原子发射光谱仪存在体积大、功耗高、用气量大、操作复杂等问题，导致其无法实现快速现场分析。在化工、地质、环境分析、食品安全、公共卫生、突发应急事件以及日常监测等领域，对现场便携式检测技术或实时在线检测的需求日益迫切。这些需求促使我们必须及时确定污染源，从而对突发事件采取应急措施提供科学理论依据。

为了克服商业大型仪器，包括传统的电感耦合等离子体光谱仪(ICP)和质谱仪(MS)等不能进行现场分析的限制，发展小型化便携式仪器变得尤为重要。微等离子体因其小体积、低能耗、低成本等优势，在原子光谱小型化方面获得了极大的关注。微等离子体是尺寸范围被限制在有限微小空间范围内(几微米到几毫米级)的非热平衡低温等离子体(图1)<sup>[8]</sup>，通常由放电电离产生，其组分包括电子、离子以及未电离的低温气体等，能够在室温大气压下产生并维持。微等离子体具有以下特征：(1) 微等离子体中正负电荷粒子浓度相等，整体呈现电中性；(2) 微等离子体中电子运动剧烈，温度可高达几千K，而气体和离子组分则运动不剧烈，温度接近室温，呈现非热平衡特征，整体表现为低温等离子体；(3) 具有等离子体的振荡特征。

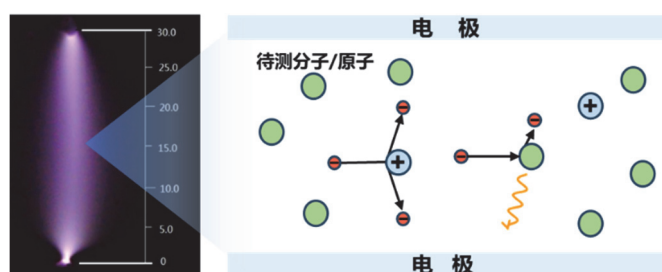


图1 微等离子体原子化过程<sup>[9]</sup>

鉴于微等离子体的这些特征，微等离子体原子发射光谱仪成为一种理想的小型化仪器，它在现场分析检测中取得了诸多进展，并且其相关应用也逐渐增多<sup>[10,11]</sup>。这种仪器的设计不仅满足了现场

快速分析的需求，同时也为教育领域提供了一种高效、经济的教学工具，有助于学生更好地理解和掌握原子光谱分析的原理和技术。设计理念上，采用经济耐用材料，同时保证仪器的可靠性；采用小型化和集成化设计，降低制造成本，简化操作流程，便于学生理解和使用。同时，提供模块化组件，支持个性化定制和功能扩展，以适应不同教学需求，增强教学的灵活性，促进学生的实践操作和科研思维培养。可扩展性设计也允许未来集成新技术，确保仪器长期适应教育和研究的发展需求。

## 2 教学微等离子体原子发射光谱仪基本构造

教学微等离子体原子发射光谱仪构造示意图如图2所示，由载气系统、进样系统、激发源(微等离子体)、检测系统、计算机系统、电源等部分组成，其中进样系统、激发源、检测系统是微等离子体原子发射光谱仪的核心部分。图3为教学光谱仪三维设计效果图。

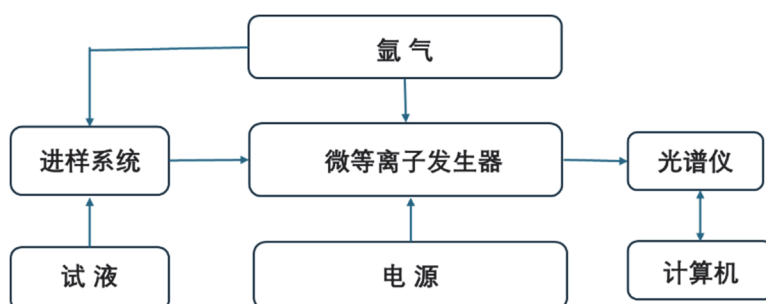


图2 教学微等离子体原子发射光谱仪构造示意图

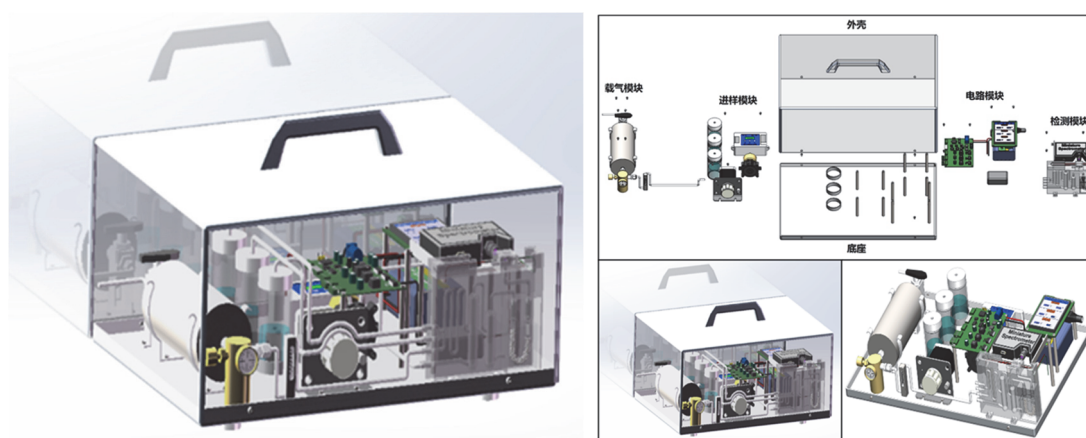


图3 教学光谱仪三维设计效果图

### 2.1 载气系统

载气的选择和流速对微等离子体原子发射光谱的分析性能有重要影响，它是微等离子体原子发射光谱中的一个重要组成部分，主要包括气源(压缩瓶或气体发生器)、流量控制器(流量计和阀门)，用于样品的输送、维持微等离子体的稳定和保護微等离子体反应区的电极不受样品污染。通过优化载气流量和组成，还可以提高分析的灵敏度。常用的载气包括氩气和氦气。

### 2.2 进样系统

试样的引入方法和技术对分析方法的灵敏度、检出限和抗干扰能力起着关键性的决定作用。实际样品分析过程中，常常面临共存基质复杂、目标分析物浓度低和基体干扰严重等问题，因此需要结合样品分离富集技术对痕量分析物进行提取、分离和浓缩富集，以提高检测灵敏度，降低检测限。常用的进样方式有直接溶液进样、化学蒸气发生(冷蒸气(CV)、氢化物发生(HG)(图4))、光化学蒸气

发生 (PVG)、微等离子体诱导蒸气发生( $\mu$ PIVG))、电热蒸发(ETV)、基于激光的样品引入(激光烧蚀(LA)、二极管激光热气化(DLTV))以及气相色谱(GC)、高压液相色谱(HPLC)与发射光谱的技术联用。对小型化的微等离子体发射光谱的现场应用发展来说, 结合能够满足环境现场分析需求的简单进样技术尤为关键。同时, 为减少微等离子体能量消耗, 将分析物转化为“干燥”状态物种(如气态挥发物), 并将其快速传输到激发源, 可以提高进样效率, 减小进样过程中样品基质及副产物的干扰影响。

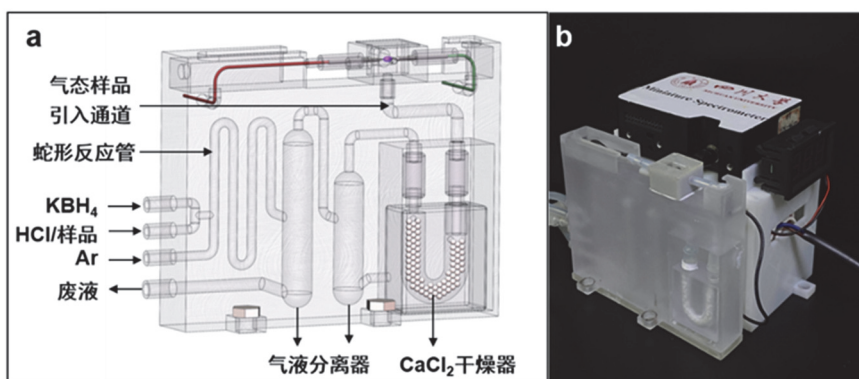


图4 氢化物发生模块设计图(a)和实物图(b)

### 2.3 放电类型(激发源)

微等离子体激发源是一种新型的激发源, 它具有体积小、能耗低、价格低廉等优点, 在发射光谱仪器的微型化发展中展现出巨大的应用潜力, 其工作原理是: 通过电场或电磁场在微小空间内产生等离子体, 使得样品中的原子和分子在高温环境下被激发。微等离子体激发源产生方法多样, 包括介质阻挡放电微等离子体(DBD)、尖端放电微等离子体(PD) (图5)、液体电极放电微等离子体(LEP)、大气压辉光放电微等离子体(APGD)、微波等离子体源(MSP)和微型电感耦合等离子体(mICP)。这些不同的微等离子体源具有不同的特性和应用场景, 除了可以直接测定气相或液体中的分析物, 还可与气相色谱(GC)、化学蒸气发生(CVG)、电热蒸发(ETV)、微电渗析( $\mu$ ED)、毛细管电泳(CE)等多种进样技术联用, 极大地扩展了应用范围。教学用微等离子体光谱仪可以根据不同的教学目的, 选择恰当的激发源与其他技术进行组合, 以实现多样化的实验目的和教学内容。

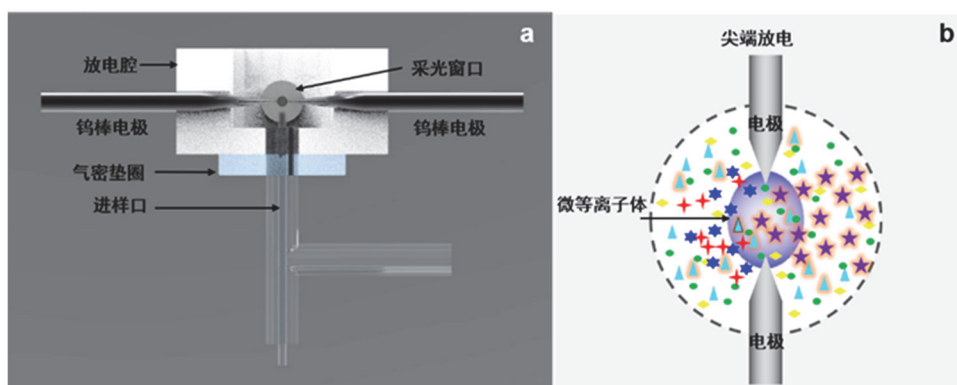


图5 尖端放电微等离子体(PD)装置结构图(a)和示意图(b) [12]

### 2.4 检测系统

在激发源的作用下, 样品中的原子或分子被激发到高能态。当这些激发态的原子或分子返回到基态时, 会发射出特定波长的光谱线(特征谱线), 发射出的光谱通过光谱仪进行收集和分析。光谱仪

可以是单色仪、多通道检测器或阵列检测器等形式，能够分辨并测量不同波长的光强度，并由探测器如光电倍增管(PMT)或电荷耦合器件(CCD)检测并记录光谱信号。

## 2.5 数据处理系统

数据处理系统是对信号进行放大、记录、分析，并计算生成样品中各元素的浓度数据。完整的数据处理系统(包括专用软件和硬件组件)：光探测器输出的电信号经信号放大器增强后(提升检测的灵敏度)，被数据采集系统转换成数字信号，并进行记录和存储，随后，数据分析软件对这些光谱数据进行处理，这包括光谱校准、背景扣除、峰值识别和强度测量等关键步骤，以准确确定样品中元素的浓度。此外，软件还负责控制仪器的操作、数据的采集以及分析结果的显示和报告，实现了对整个检测流程的高效管理和自动化处理。教学用微等离子体发射光谱仪采用Ocean Optics SpectraSuite数据采集软件(图6)。

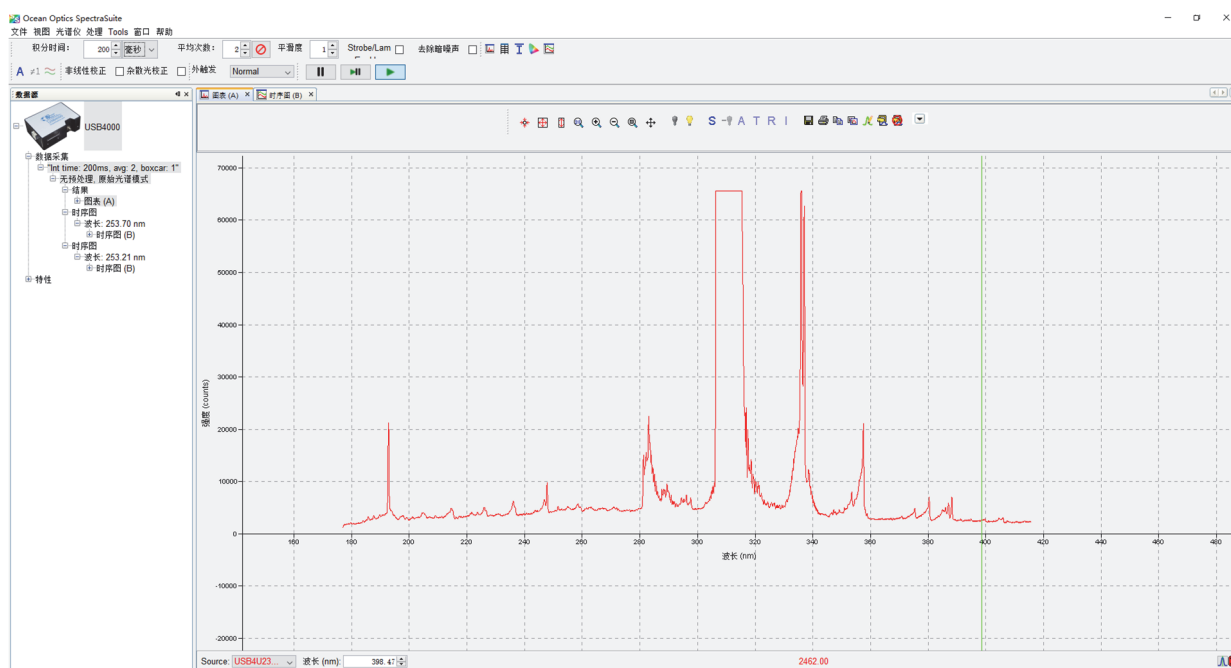


图6 Ocean Optics SpectraSuite数据采集软件

## 2.6 供电系统

在微等离子体发射光谱仪中，等离子体的产生是分析过程的核心，供电系统必须提供稳定和适当的电流或电压来维持等离子体的稳定运行。除了控制等离子体的放电条件、维持仪器整个系统的电气稳定性，电源可能还要为样品的前处理过程提供所需的能量，确保样品能够有效地引入到等离子体中。教学微等离子体原子发射光谱仪用12 V或24 V的锂电池配以调压器使用。

## 2.7 仪器组装

3D打印技术在现代实验室中的应用越来越普遍(图7)，可以为实验室常用零件教具提供技术支持，提升实验设计的多元性和可操作性，有助于培养学生的想象力和创新创造能力。同时，设计信息的完整复制和共享也可保证迭代原型制作的可重现性，利于实验室成果转化和产业化制造应用。3D打印技术的简单经济、快速一步成型制造的优势，可实现教学便携式微等离子体原子发射光谱仪的个性化设计和标准化制造。在此基础上，如将分离富集技术和蒸气发生进样方式与3D打印微等离子体发射光谱仪相结合，有望解决目前小型化仪器制造方面存在的结构松散、体积庞大等问题，并进一步提高方法分析性能，使其稳定性更好，重现性更高。

图7 3D打印操作步骤<sup>[13]</sup>

### 3 教学实践

通过采用这款教学微等离子体原子发射光谱仪，四川大学化学学院在国际课程周期间特别开设了一门“蓉城水文与水质调研”课程。该课程针对“拔尖计划”“强基计划”的高段学生实施了创新的教学方法，并获得了显著的教学成效。以“微等离子体原子发射光谱仪的自搭建与应用”为案例，本文将展示相关的实验教学策略和所取得的教学成果。

#### 3.1 实验目的

掌握原子发射光谱仪的基本构造以及光谱仪分析方法的基本原理；掌握进样体系、微等离子体激发源、检测器等主要部件的工作原理；采用3D打印技术打印相应部件，搭建光谱仪，并用于实际样品的分析检测。

#### 3.2 实验原理

教学光谱仪的主要模块及其各模块的工作原理详见第2节“教学微等离子体原子发射光谱仪基本构造”。

各种元素的原子被激发后，发射许多波长不同的光谱线。元素的原子结构不同，可发射出各具自身特征的原子光谱，根据各元素的特征谱线，可对该元素进行定性分析。特征谱线的强度 $I$ 与试样中该元素含量 $C$ 符合塞伯-罗马金经验公式：

$$I = aC^b$$

式中 $a$ 为常数，与试样的蒸发、激发和组成有关； $b$ 为自吸收系数，与谱线的自吸有关。基于此公式，利用标准曲线法或者内标法可以对元素进行定量分析。

#### 3.3 实验内容

##### 1) 主要部件模块的设计及其3D打印

学生在熟悉教学光谱仪基本构造和工作原理的基础上，结合实验的目的和要求，通过小组合作的方式，完成整个实验装置各个模块的设计并利用3D打印技术进行打印。

##### 2) 教学光谱仪的自搭建

根据教学光谱仪的构造示意图(图2)以及三维示意图(图3)，利用打印完整的进样系统、微等离子腔体等主要模块，组装好各模块并与检测系统相连接，完成教学光谱仪的自搭建(图8)。检查好各模块连接正确无误后，打开载气开关，检查气路是否密闭、无漏气现象。

##### 3) 仪器性能参数的调试优化

为获得仪器的最佳性能和最佳响应信号，对微等离子体的激发条件参数，包括电极间距、放电电压、载气流速以及光谱信号采集系统参数，包括积分时间、平均次数、平滑度进行调试和优化。



图8 自搭建教学微等离子体原子发射光谱仪实物图

#### 4) 教学光谱仪的应用

环境水样中汞的检测：将1 mL环境水样与0.001% (m/v)的 $\text{KBH}_4$ 以 $0.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速泵入化学蒸气发生装置(CVG)中进行反应。4% (v/v)的HCl载流溶液协同氩气一起推动反应管内的反应产物连续通过两个气液分离器(GLS)，挥发性分析物 $\text{Hg}^0$ 与基底有效分离，经 $\text{CaCl}_2$ 干燥后在尖端放电微等离子体中被激发。原子发射信号通过CCD光谱仪采集，积分，以峰面积定量。图9所示即为教学光谱仪用于环境水样中汞的现场分析。

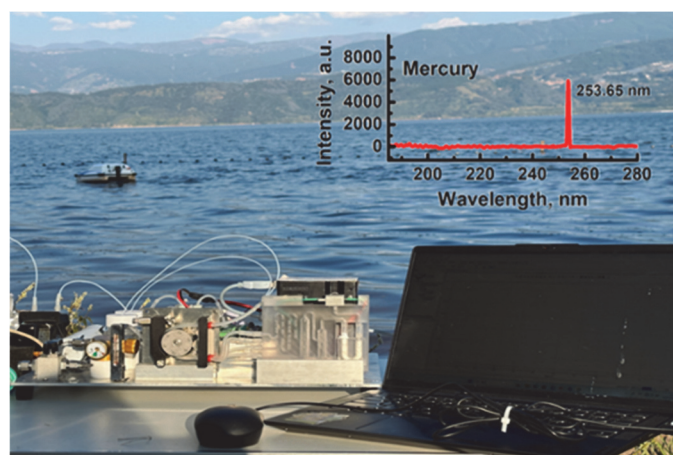


图9 教学光谱仪用于环境水样中汞的现场分析

### 3.4 特点

- 1) 采用开放式仪器结构，操作者可以近距离观察仪器中每个部件和激发源状态；
- 2) 选用透明3D打印树脂材料，可清晰展示氢化物发生反应和尖端放电过程，有助于仪器原理的理解；
- 3) 触屏数控，一键操作完成参数设置；锂电池驱动电源系统体积小、重量轻、无机械噪音；
- 4) 软件操作简单，易于上手，具有完善的帮助工具和使用提示。

### 3.5 实验注意事项

- 1) 所有连接部件紧密牢固，防止漏气或电气接触不良。
- 2) 确保使用纯净的工作气体，避免杂质干扰光谱分析。
- 3) 选用耐高温、耐腐蚀的材料来构建等离子体反应腔和其他关键部件，以延长仪器使用寿命和

提高稳定性。

4) 微等离子体的稳定性对分析结果至关重要，需要监控并保持等离子体的一致性和稳定性。

5) 精心设计电路，确保连接仪器电源的稳定性和安全性，避免电路过热或短路，以及电源波动对测量结果产生影响。

6) 使用标准物质进行校准，以确保结果的准确性和可比性。

7) 有机汞和汞蒸气都有剧毒，实验过程中应特别注意个人防护，避免直接接触含汞试剂。实验应在通风设备或敞开环境中操作，操作完毕后及时清理实验台防治汞沉积。实验中所有含汞废水的处置均按照相关规定严格执行。

### 3.6 思考题

1) 小型化光谱仪主要由哪些部分构成？其作用分别是什么？

2) 原子发射光谱定性和定量分析的基本理论是什么？

3) 目标元素的谱线强度会受到哪些因素的影响？

4) 如何提高仪器的灵敏度？

## 4 教学反馈与教学建议

教学用微等离子光谱仪可以根据不同的教学目的，选择恰当的激发源与其他技术进行组合，以实现多样化的实验教学内容和研究方法。例如，为了向学生展示原子发射光谱的原理，可以选择常压辉光放电微等离子体激发源与光化学蒸气发生技术联用，进行水体中痕量金属元素的检测实验。这样的组合不仅能够提供实际的案例分析，还能让学生了解现代光谱分析技术的发展和前景。在另一个教学场景中，如果目的是教授气相色谱技术，微等离子体光谱仪可以与气相色谱(GC)联用，通过微等离子体作为检测器，进行复杂样品中组分的定性和定量分析。这种组合能够帮助学生理解色谱分离与光谱检测的协同作用。此外，为了培养学生的实验技能和创新能力，教师还可以引导学生探索微等离子体光谱仪与其他技术的新型组合，如与电热蒸发(ETV)、微电渗析( $\mu$ ED)或毛细管电泳(CE)等技术的结合，开展创新性的实验项目。通过这些实践活动，学生不仅能够掌握理论知识，还能获得宝贵的实践经验，为将来的科研或工业分析工作打下坚实的基础。

## 5 结语

教学微等离子体原子发射光谱仪的引入为高等教育实验教学注入了新的活力，其设计和构造提供了一个创新的教学平台。该仪器的模块化设计结合3D打印技术，不仅增强了仪器的灵活性和便携性，还为学生提供了一个高度集成的实验工具。这种设计使得学生能够在实验中实现个性化定制，通过自主设计实验，显著提升了他们的创新创造力和实践能力。本文提出的改革措施和教学模式，通过结合创新的教学内容和方法，全面培养了学生的综合科学素质和实践技能。教学光谱仪的实践应用，有效地解决了传统教学中理论与实践脱节的问题，通过将仪器分析实验与理论教学紧密结合，能够更深入地理解仪器分析的原理和方法，进一步巩固和深化了学生的理论知识。随着教育技术的不断进步，这种自搭建的教学光谱仪的引入也体现了未来教育的发展趋势。它的模块化和技术创新不仅适应了个性化学习的需求，而且通过跨学科的整合，为学生提供了接触前沿技术的机会。

教学光谱仪在实验教学中的应用，不仅提升了教学质量，还激发了学生的科研兴趣，促进了学生创新思维的发展。通过不断的教学改革和实践，这一教学模式为我国基础学科人才的自主培养提供了有力支持。这一改革不仅促进了学生实验技能和跨学科能力的提升，也为高等教育的教学改革提供了新的思路和方法，为培养具有高水平科研素养和创新能力的人才奠定了坚实的基础。

综上所述，教学微等离子体原子发射光谱仪的实验教学应用，展现了其在适应未来教育发展中的重要作用，为培养新时代所需的高素质人才提供了有效的教学支持和实践平台。

参 考 文 献

- [1] 苏海峰, 邓顺柳, 李云凯, 吴迪, 林志敏, 黄晓圳, 梁曼玉, 卢文和, 邱源, 郑兰荪. *大学化学*, **2023**, *38* (10), 225.
- [2] 李琰, 丁飞, 王京, 南晶, 李一峻, 邱晓航. *大学化学*, **2024**, *39* (2), 208.
- [3] 耿士忠, 潘志明, 黄金林, 孙林. *教育教学论坛*, **2018**, *1* (5), 268.
- [4] 杨晓霞. *化工教学*, **2023**, *49* (10), 136.
- [5] 种瑞峰, 常志显, 冯彩霞, 张凌, 李德亮. *实验科学与技术*, **2021**, *19* (4), 51.
- [6] 李佳佳, 姜琳琳, 郁韵秋, 李嫣. *实验室科学*, **2020**, *23* (6), 228.
- [7] 李娇, 骆睿昊, 金谷. *化学教育(中英文)*, **2021**, *42* (24), 44.
- [8] 张树宇, 辛煜, 宁兆元, 梁荣庆. *物理*, **2007**, No. 10, 771.
- [9] Pan, X. M.; Lin, Y.; Su, Y. B.; Yang, J. H.; He, L. B.; Deng, Y. R.; Hou, X. D.; Zheng, C. B. *Anal. Chem.* **2021**, *93*, 8257.
- [10] Yu, Y.; Du, Z.; Chen, M.; Wang, J. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47* (41), 7909.
- [11] Zhu, Z. L.; Chan, G. C.-Y.; Ray, S. J.; Zhang, X. R.; Hieftje, G. M. *Anal. Chem.* **2008**, *80* (22), 8622.
- [12] Yang, Y.; Tan, Q.; Lin, Y.; Tian, Y. F.; Wu, L.; Hou, X. D.; Zheng, C. B. *Anal. Chem.* **2018**, *90*, 11996.
- [13] Agrawaal, H.; Thompson, J. E. *Talanta Open* **2021**, *3*, 100036.