

## 拉曼散射光谱法实验教学设计与实践

彭微, 温宝英, 李华敏, 王翊如\*, 李剑锋\*

厦门大学化学化工学院化学系, 化学国家级实验教学示范中心(厦门大学), 福建 厦门 361005

**摘要:** 拉曼光谱是一种无损的分析技术, 能够提供物质的结构和成分信息, 已被广泛应用于化学、生物学和材料科学等领域的分析和研究中。经过三年的教学, 拉曼散射光谱法实验的教学设计已获得诸多实践经验。该实验项目分别设计了定性分析、定量分析和痕量分析三部分内容, 从生活中常见的真假翡翠的辨别入手, 激发与培养学生自主学习拉曼光谱相关知识的兴趣和热情。通过对便携式拉曼光谱仪的使用让学生理解仪器的结构和功能, 掌握拉曼光谱法和表面增强拉曼光谱法的基本原理。经过本实验项目的学习, 学生能够正确使用拉曼光谱仪测试固体样品、液体样品和痕量物质, 为掌握相关的光谱学知识奠定良好的基础。

**关键词:** 拉曼散射光谱法; 表面增强拉曼光谱法; 定性分析; 定量分析; 拉曼光谱仪

**中图分类号:** G64; O6

## Exploration and Practice on Raman Scattering Spectroscopy Experimental Teaching

Wei Peng, Baoying Wen, Huamin Li, Yiru Wang\*, Jianfeng Li\*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, National Experimental Teaching Demonstration Center of Chemistry (Xiamen University), Xiamen 361005, Fujian Province, China.

**Abstract:** Raman spectroscopy, a non-destructive analytical technique, provides information about the structure and composition of substances. It has been widely applied in the fields of chemistry, biology, and materials science for analysis and research. Through three years of pedagogical development, our instructional design for Raman scattering spectroscopy experiment has accumulated considerable practical experience. This experimental course is structured around three segments: qualitative, quantitative, and trace analysis, initiating with the intriguing task of distinguishing between authentic and counterfeit jadeite—a familiar challenge that ignites students' curiosity and eagerness to delve into Raman spectroscopy. Utilizing portable Raman spectrometer enables students to gain an understanding of the instrument's construction and functionality, while mastering the fundamental concepts of Raman spectroscopy and its surface-enhanced variant. This educational venture equips students with the proficiency to adeptly conduct Raman spectroscopic analyses on solid and liquid samples, as well as trace substances, thus establishing a solid foundation for their mastery of related spectroscopy analysis courses.

**Key Words:** Raman scattering spectroscopy; Surface-enhanced Raman spectroscopy; Qualitative analysis; Quantitative analysis; Raman spectrometer

拉曼光谱法具有分辨率高, 可以精确地分辨出不同的拉曼频移提供准确的分析结果, 这对于研究样品的微结构、晶格结构等起着重要作用。此外, 它还具有重现性好, 操作简单快速, 无需特殊

收稿: 2023-12-19; 录用: 2024-02-26; 网络发表: 2024-03-08

\*通讯作者, Emails: yrwang@xmu.edu.cn (王翊如); Li@xmu.edu.cn (李剑锋)

基金资助: 2022年度基础学科拔尖学生培养计划2.0 (20222111)

制样,且不受水、二氧化碳和石英干扰等特性,因此试样可以直接通过光纤探头或通过玻璃、石英、蓝宝石窗和光纤进行无损、原位及时间分辨测定。同时,由于水的拉曼散射极弱,拉曼光谱法非常适用于水体系的研究,比如电化学体系。拉曼光谱可以检测 $50\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ 整个波数区间的振动信号,尤其是对于低波数测量具有独特的优势<sup>[1]</sup>。

拉曼光谱和红外吸收光谱通常被称为“姐妹光谱”,因为它们和分析物质结构时既相似又互补。尽管拉曼光谱和红外吸收光谱的产生机理有所不同,前者是通过分子对入射光的散射获得的,而后者是通过分子吸收红外光而产生的,但它们都涉及分子的振动能级跃迁。因此,对于给定的化学键,某些峰的红外吸收频率和拉曼位移是相等的。在学习拉曼散射光谱法实验之前,学生已经学习了红外光谱实验,对红外吸收有着完整的理解。在教学过程中,通过与红外光谱的比对方式进行讲解,有助于学生理解这两种振动光谱的异同点。

目前,拉曼光谱技术已经在生物学、材料、地质、考古、医药、食品、珠宝和化学化工等各个领域得到了广泛的应用。拉曼散射光谱实验旨在让学生了解拉曼散射和表面增强拉曼散射的基本原理,了解便携式拉曼光谱仪的基本结构与功能,掌握利用拉曼光谱仪进行定性、定量和痕量物质分析方法,并通过自主操作拉曼仪器,使学生学会正确采集信噪比良好的拉曼散射光谱图的方法及理解拉曼散射光谱图的意义。

## 1 实验原理

当一束光照射到物质或样品上时,大部分的光被物质反射或透射,小部分的光则会按照不同的角度散射开来,这种现象称为光的散射。光的散射可以分为两种情况,一种是散射光的频率没有发生变化,即入射光和物质之间没有发生能量交换,只是方向发生改变,这种散射称之为弹性散射,比如瑞利(Rayleigh)散射。另外一种散射光是光的方向和频率都发生变化,这种散射则为非弹性散射,是由于光与物质之间发生了能量交换所产生的,通常称之为拉曼散射。非弹性散射光的频率与入射光的频率不同,从而产生了拉曼位移。由于不同分子的化学结构对应的振动、转动能级是不一样的,因此其拉曼位移的大小也是不一样的。所以,利用拉曼位移可以研究物质的结构,对应的方法被称为拉曼光谱法,其所使用的仪器为拉曼光谱仪<sup>[2]</sup>。

根据图1所示的原理,在分子处于电子基态的特定振动能级(如 $\nu_0$ 、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ )时,当吸收入射光子的能量 $h\nu_0$ 后,分子会发生跃迁至虚态。随后,该分子会迅速( $10^{-8}$ 秒内)返回到原来的振动能级,并以光子的形式释放吸收的能量 $h\nu_0$ ,这个过程称之为瑞利(Rayleigh)散射。如果受激分子不返回原来所在的振动能级,而是返回其他振动能级,如从基态电子能级的基态振动能级( $\nu = 0$ )跃迁到激发虚态的分子不返回基态,而返回至电子基态的第一振动激发态能级( $\nu = 1$ ),此时散射光子的能量为 $h\nu_0 - h\Delta\nu$ ,由此产生的Raman线为Stokes线,其频率低于入射光频率。若处于基态电子能级第一振动激发态的分子跃迁到激发虚态后,再返回到基态振动能级,此时散射光子的能量为 $h\nu_0 + h\Delta\nu$ ,所产生的Raman线称为反Stokes线,其频率高于入射光频率。由Blotzmann分布可知,常温下处于基态的分子占绝大多数,因此,Stokes线远强于反Stokes线。此外,温度的升高,Stokes线的强度将降低,反Stokes线的强度将增加。Stokes线或反Stokes线与入射光的频率差 $\Delta\nu$ 为Raman位移,即 $\Delta\nu = \nu_R - \nu_0$ 。Raman位移与入射光频率即激发波长无关,只与分子振动能级跃迁有关。由于不同物质的分子具有不同的振动能级,因此Raman位移具有特征性,是研究分子结构的重要依据。

### 1.1 拉曼散射光谱法测定固体物质

拉曼散射光谱图中的散射峰的数目及所对应的波数是由待测物质分子结构所决定的,是分子结构的特性的反映。因此,可根据拉曼散射光谱图的特征峰,对物质进行定性分析和结构分析。用拉曼散射光谱法测定固体样品,只需直接将激光对准待测物即可,根据谱图,查出各特征拉曼峰的波数并推断其官能团的归属,从而进行定性和结构分析。拉曼散射光谱法的具体应用:鉴定宝石、翡翠、钻石、真假字迹辨认等。2017年,国家质量总局、中国国家标准化管理委员会批准发布了GB/T

16553–2017《珠宝玉石鉴定》新标准，并于2018年5月1日正式实施。因此，本实验以测试真假翡翠和固体粉末样品为例来进行定性分析实验设计。

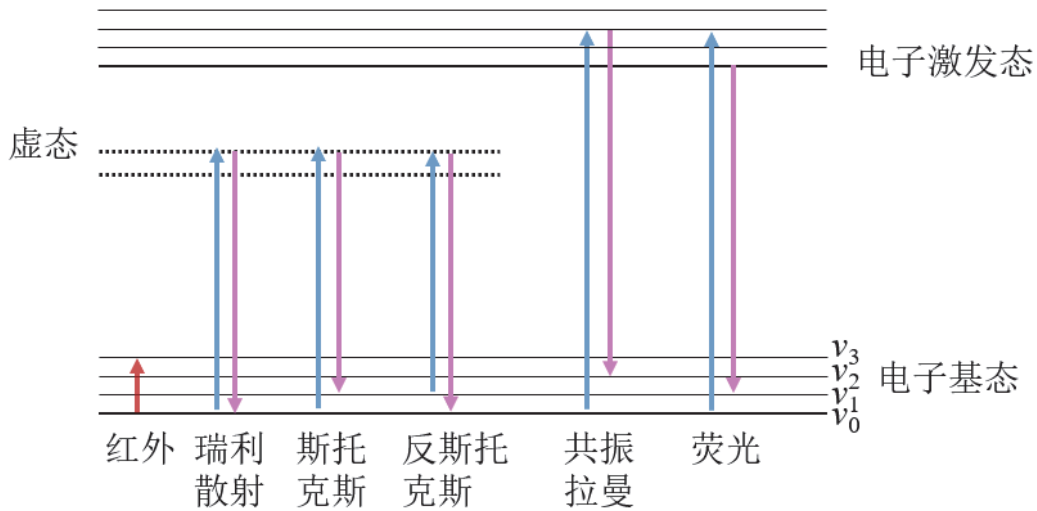


图1 拉曼散射原理图

翡翠简单分为真货翡翠和假货翡翠：真货则是指天然翡翠玉件，未经充填(如高分子聚合物)和加色处理的。假货则是经强酸清洗后再加色处理的翡翠玉件(硬玉结构已被破坏)或者非翡翠样品(如加工石头、塑料等)冒充翡翠。

天然翡翠的矿物成分为硬玉(主要成分为钠铝辉石， $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ )，其拉曼光谱图如图2所示。其三个主要特征峰位于 $1040$ 、 $700$ 和 $375\text{ cm}^{-1}$ 。其中 $1040\text{ cm}^{-1}$ 属于 $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ 基团的Si—O对称伸缩振动， $700\text{ cm}^{-1}$ 属于Si—O—Si的对称弯曲振动， $375\text{ cm}^{-1}$ 属于Si—O—Si不对称弯曲振动。本实验判定翡翠真假的标准为：若样本包含翡翠的三个主要特征峰，则判定为真翡翠，否则，则为假翡翠。

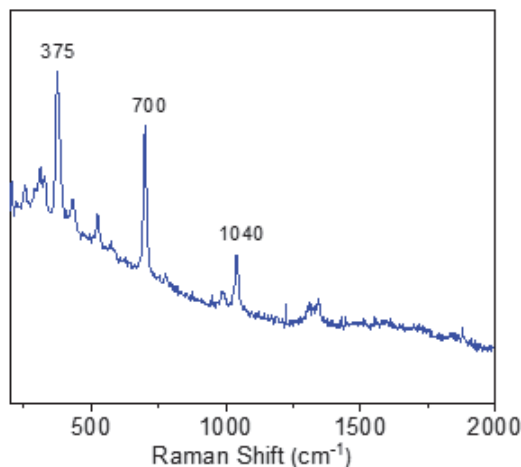


图2 翡翠的拉曼光谱图

### 1.2 拉曼散射光谱法测定液体物质

拉曼散射光强度取决于多重因素，包括光源的强度、分子的极化率、活性基团的浓度等。其中拉曼散射光强度与活性成分的浓度成正比例，因此可利用拉曼光谱技术来进行定量分析，本实验以

乙醇的定量为例来进行定量分析实验设计。

在一定条件下，拉曼信号强度与产生拉曼散射的待测物的浓度成正比。拉曼谱带的强度与待测物浓度的关系遵守比尔定律：

$$I_v \propto a \cdot C$$

其中， $I_v$ 为光学系统所收集到的样品表面拉曼信号强度。 $a$ 为比例系数，它与样品表面的激光入射功率、分子的拉曼散射截面积、入射光和散射光通过的距离、样品池的厚度等因素有关。因此，在控制其他因素不变的情况下，Raman散射光强度与物质浓度成正比，从而可以进行定量分析。

拉曼光谱定量测定的一般步骤如下：

1. 利用拉曼光谱鉴定乙醇样品，获得乙醇的拉曼光谱图。
2. 选择适当强度的分析谱带，该谱带不与样品的其他谱带重叠。
3. 配制乙醇的标准样品母液，利用逐级稀释的方法来制备一组不同浓度的标准样品。
4. 在相同的条件下测定上述不同浓度的标准样品和被测样品的拉曼谱图，取拉曼光谱峰的高度或峰面积，得到强度值 $I$ 。
6. 绘制 $I_s-C_s$ 工作曲线， $C_s$ 是标准样品中乙醇的浓度， $I_s$ 是标准样品中分析谱带的强度。
7. 测定被测样品的强度值 $I$ ，由工作曲线可求出被测试样的乙醇浓度。

### 1.3 表面增强拉曼散射光谱法测定痕量有机化合物

在前面的两个实验中我们分别利用拉曼光谱进行了定性和定量分析，让学生理解了拉曼光谱的优势。然而，拉曼光谱法的主要局限在于它的定量范围很窄。这是由于拉曼散射光强度很弱，通常，拉曼散射光强度约为入射光强度的 $10^{-6}$ – $10^{-9}$ 。这一局限性极大地限制了该技术的发展和应。因此，利用表面增强拉曼光谱技术(Surface Enhancement of Raman Scattering, SERS)来放大拉曼散射过程，并实现痕量分析至关重要。表面增强拉曼光谱技术是一种具有极高的表面检测灵敏度的光谱技术，在具有纳米级粗糙的Au、Ag、Cu等币族金属结构的表面通常可以产生超过 $10^6$ 倍的巨大增强效应，使得吸附在纳米结构表面的分子的拉曼信号得到上百万倍的增强，从而实现对痕量物质的分析检测<sup>[3,4]</sup>。

在大部分的SERS体系中，电磁场增强机理是目前公认的增强机理。其中，局域表面等离子体共振效应起主要贡献：当一束光与金属纳米颗粒相互作用时，会导致纳米粒子内导带的电子发生振荡。当激发光的频率和导带电子的共振频率相匹配时，该激发光就可以将纳米结构表面的自由电子激发出来，使得这些自由电子在金属表面形成电子的集体振荡，从而形成表面等离子体共振的现象，导致强烈的吸收或散射。这种共振效应最终会导致纳米粒子周围产生局域的增强的电场，从而极大地增强金属表面或者附件的分子的拉曼信号。具有自由电子的Au、Ag等纳米粒子，这种效应特别明显<sup>[5]</sup>。

近年来，SERS的应用在各个领域得到广泛的关注，本实验以肌酐检测为例来进行痕量分析实验设计。

肌酐测试的意义：选用适当的分析方法分析生物标志物的含量与状态，能为疾病早期的诊断做出巨大贡献。肌酐是慢性肾病的关键生物标志物，当今全球每年有数十亿人备受慢性肾病诱发病，例如高血压、高血脂、糖尿病等的影响。如何用快速、简单、方便的方法检测肌酐，是一件十分有意义的事情。本实验选用 $685\text{ cm}^{-1}$ 作为肌酐的SERS特征峰，并采用金纳米溶胶作为SERS增强剂<sup>[3]</sup>。金纳米粒子的合成是采用经典的柠檬酸钠还原法，即在加热沸腾的条件下以柠檬酸钠为保护剂和还原剂，将 $\text{HAuCl}_4$ 还原成金纳米粒子。具体步骤如下：将200 mL质量分数为0.01%的 $\text{HAuCl}_4$ 水溶液加热至沸腾，随后快速加入1.4 mL质量分数为1%柠檬酸钠水溶液，2–3 min后溶液变成棕红色。保持微沸40 min后，停止反应，常温冷却后即得到粒径约为55 nm Au纳米粒子。55 nm Au纳米粒子增强性能优异，我们团队通过利用其实现了检测限为 $42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的肌酐水溶液的检测<sup>[3]</sup>。此外，Au纳米粒子十分稳定，当置于洁净的玻璃瓶中保存时，其稳定保存时间大于12个月，非常适合用于科学与教学研究中。

## 2 仪器与试剂

拉曼光谱仪是化学、物理、生物等诸多学科必备的分析测试工具，尤其是在化合物结构鉴定、成分测定等方面具有不可替代的作用<sup>[6,7]</sup>。

如图3，本教学实验所采用的拉曼光谱仪为商业化的箱体式拉曼光谱仪RFS1000，仪器由厦门赛纳斯科技有限公司提供，仪器小巧轻便，操作简单，非常适用于教学过程中学生自主操作实验，从而可以从便携式拉曼光谱仪拓展到大型拉曼光谱仪的学习与应用。该实验所用到的便携式拉曼光谱仪的仪器激光波长为785 nm，最大功率为500 mW (连续可调)，光谱范围为100–3200  $\text{cm}^{-1}$ ，谱图分辨率约为9  $\text{cm}^{-1}$ ，该分辨率是当仪器在关闭光源时，测试汞氙灯的拉曼特征峰的半峰宽的宽度。仪器配有多种测试附件，支持直接测试固体与液体样品，操作方法简单、便于学生上手操作。



图3 箱体式拉曼光谱仪RFS1000实物图

试剂：真假翡翠样品(总翡翠样品数目为20个，其中真翡翠为15个，假翡翠为5个)、尿素固体样品、超纯水，无水乙醇，未知浓度的乙醇溶液，肌酐溶液(100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )，NaCl(1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )，金纳米溶胶。

实验过程中使用的纳米颗粒为金纳米溶胶，是采用Frens发明的柠檬酸钠还原法合成的金溶胶，该制备方法简单、稳定性好（常温下可以放置超过一年，非常适合一学期的实验教学，制备一次即可）、成本低(单次实验使用的金纳米溶胶的成本不超过1元)、重现性高。

## 3 实验步骤

### 3.1 固体样品的测试

按仪器使用方法启动仪器并使之运行正常。

翡翠样品测试：将激光探头对准测翡翠样品，调节合适的距离，使得激光光斑聚焦点落在翡翠样品上，对于本仪器，最佳聚焦距离为7.5 cm，聚焦距离过远或过近都会导致样品信号强度降低甚至无法获得样品信号。测试样品需要调节合适的采谱范围、采谱时间和激光功率。具体来说，对于固体样品，通过调节合适的参数，可以使得拉曼特征峰强度达到几千至几万。对于本实验中采集的固体或液体样品的具体参数如下图4，激光功率为500 mW，采谱范围为200–3100  $\text{cm}^{-1}$ ，采谱的时间为1 s，采集次数为1次。得到合适的谱线位置及强度后，直接导出拉曼光谱图。尿素固体样品测试：尿素样品的测试与翡翠样品的方式和参数一致，直接将激光探头对准尿素样品进行测试(图5)。

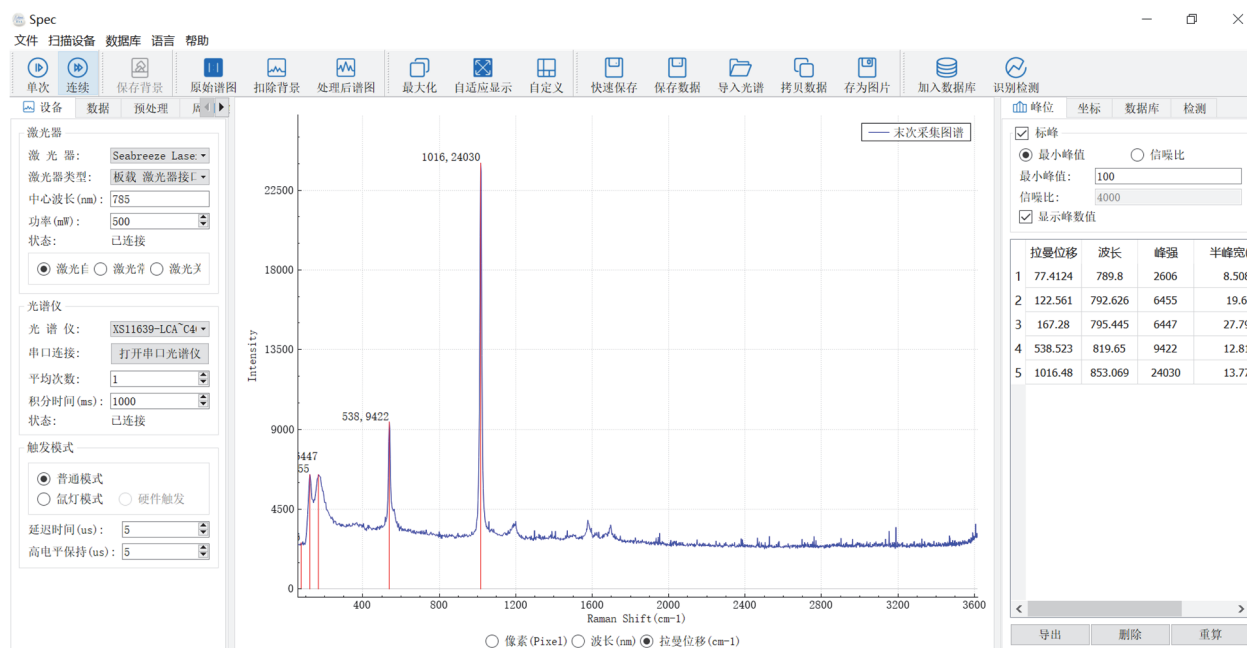


图4 便携式拉曼光谱仪采集参数图

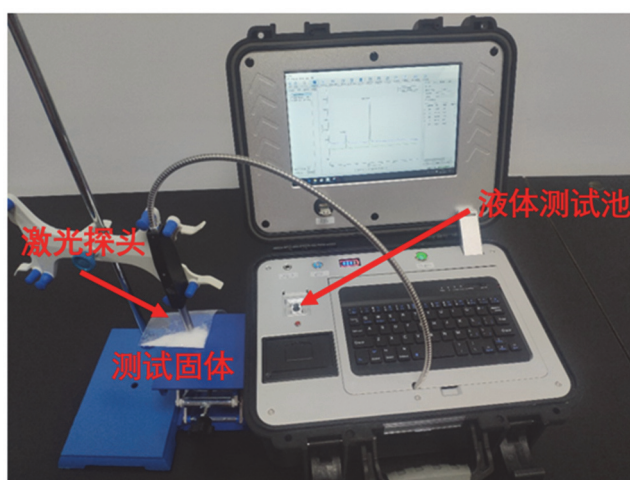


图5 便携式拉曼光谱仪测试实物图

### 3.2 液体样品的测试

将无水乙醇作为母液，利用逐级稀释的方法配置成不同体积分数的乙醇标准溶液(无水乙醇、80%、60%、40%、20%、5%)。再将待测液置于专用的液体试样池中，该液体测试池体积小，液体用量少，操作简单，焦距固定，不需要额外进行调焦。选取合适的仪器转接头和液体池，将待测液置于液体池中，然后直接将激光探头对准液体池。仔细调节采谱范围、采谱时间和激光功率，得到合适的谱线位置及强度，每组分别测试三次。依序测试不同浓度的无水乙醇，如图6，并导出拉曼光谱图，分别保存为不同体积分数的液体.csv数据文件。最后测试未知浓度的液体试样，记录特征峰的峰强度，并根据标准曲线计算未知液的乙醇浓度。

### 3.3 表面增强拉曼散射光谱法测定痕量有机化合物

准确配置10 mg·L<sup>-1</sup>的肌酐溶液，并分别测试A、B、C三份对照样品，并记录肌酐的特征峰峰强。其中，A溶液为肌酐溶液(10 mg·L<sup>-1</sup>，600 μL)；B溶液为600 μL金纳米溶胶 + 100 μL NaCl(1 mol·L<sup>-1</sup>)；C溶液为600 μL金纳米溶胶 + 200 μL(10 mg·L<sup>-1</sup>)肌酐溶液 + 100 μL NaCl(1 mol·L<sup>-1</sup>)。



图6 便携式拉曼光谱仪测试乙醇图

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 固体样品测试

#### 翡翠样品真假的判断:

天然翡翠玉件成分为硬玉( $\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ), 具有硬玉的特征峰( $1040$ 、 $700$ 和 $375\text{ cm}^{-1}$ )。在本实验中, 学生通过从真假翡翠样本中随机选取4个翡翠样品, 然后进行测试, 与真翡翠样本的拉曼峰进行对比, 从而判断翡翠样品的真假(图7所示)。通过测试不同编号的翡翠样品, 与翡翠样本的拉曼峰进行对比, 判定并记录样品的真假情况(表1所示)。

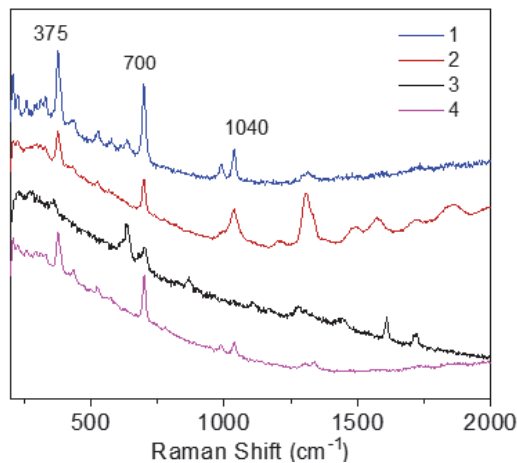


图7 真假翡翠的鉴别

表1 翡翠样品真假的判断

翡翠编号	1	2	3	4
真假判定	真	真	假	真

**尿素固体样品的测试结果：**

实验结果讨论：如图8，由实验得尿素的特征峰位置为：548，1012  $\text{cm}^{-1}$ 。

查阅文献可知尿素的特征峰归属为：

(1) C-N弯曲振动峰， $\delta(\text{CN})$ 的特征峰在548  $\text{cm}^{-1}$ ；

(2) C-N对称伸缩振动峰， $\nu_s(\text{CN})$ 的特征峰在1012  $\text{cm}^{-1}$ 。

结合实验测得数据可知，548  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰的归属为(1)，1012  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰的归属为(2)。

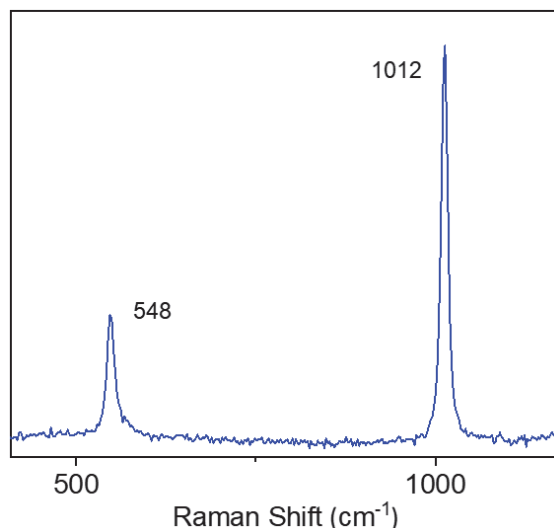


图8 尿素固体的拉曼谱图

**4.2 液体样品的测试****乙醇的测试：**

本实验中乙醇的特征峰位置为883  $\text{cm}^{-1}$ ，学生利用便携式拉曼光谱仪分别测试不同体积分数的乙醇溶液的拉曼谱图，可以得到其特征峰的峰强，并记录如表2所示。

表2 不同浓度的乙醇的特征峰峰强(883  $\text{cm}^{-1}$ )

名称	特征峰峰强(counts)1①	特征峰峰强(counts)2①	特征峰峰强(counts)3①	平均峰强(counts)2
无水乙醇	47648	48034	46960	47547
80%	36820	36228	36896	36648
60%	26343	27422	26775	26847
40%	18999	19025	17418	18481
20%	9131	9520	8994	9215
5%	2433	1926	2373	2244
未知浓度乙醇溶液	16786	16573	17062	16807

以峰强度与乙醇的体积分数作标准曲线(图9所示)，再利用未知浓度的峰强代入标准曲线求出试样中乙醇的浓度。已知 $y = 47011.65X - 400.65$ ，当 $y = 16807$ ， $X = 36.60$ ，即试样中乙醇浓度约为36.60%。

未知浓度的乙醇溶液的测试：

实验结果讨论：在实际操作中，我们准备了不同未知浓度的乙醇溶液，如图10，我们通过测量未知浓度的乙醇溶液的拉曼光谱，并对其特征峰浓度进行统计，即可根据标准曲线计算不同的未知浓度的乙醇溶液的具体浓度。

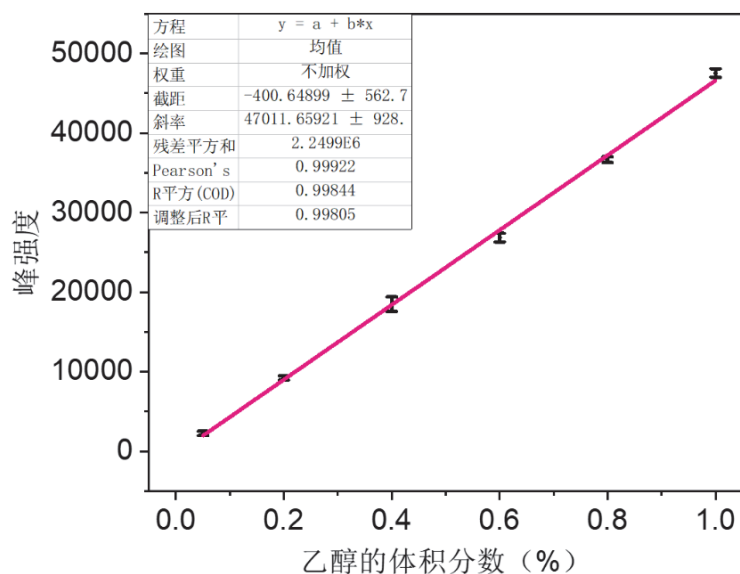


图9 不同体积分数的乙醇的测试结果

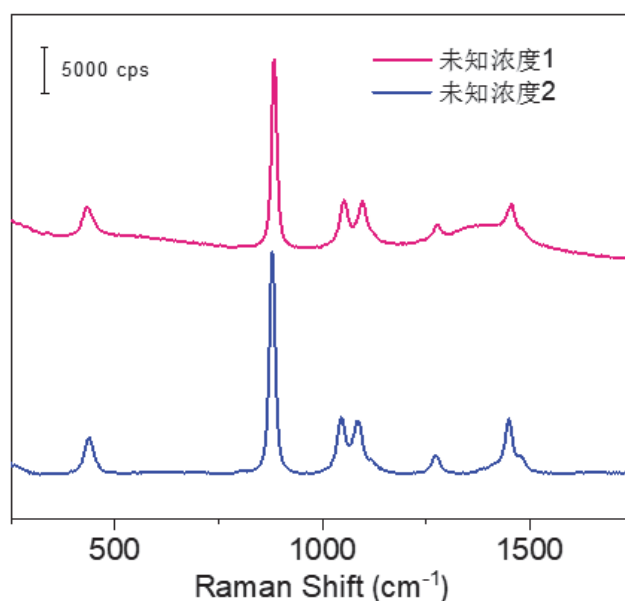


图10 未知浓度的乙醇溶液的拉曼谱图

#### 肌酐的测试:

实验结果讨论: 由图11可知, 通过给定量的 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的肌酐溶液进行拉曼光谱测试, 实验结果表明, 在该浓度下, 我们无法获得肌酐的拉曼特征峰, 从而无法进行定量分析。然而, 在后续的表面增强拉曼光谱实验中, 我们能获得 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的肌酐的SERS谱图, 更加突出SERS的优势。

#### 4.3 表面增强拉曼散射光谱法测定肌酐

在表面增强拉曼光谱的实验中, A、B组实验是对照实验。其中A组对照是常规拉曼的采集, 因为常规拉曼的检测灵敏度低, 而A组样品中由于肌酐的浓度较低, 无法直接获得待测物的拉曼信号, 因此对应的拉曼光谱未观测到肌酐分子的拉曼特征峰(图12中的黑色线)。B组实验则为空白对照实验, 由于体系内不存在肌酐分子, 所以也未观测到肌酐分子的拉曼特征峰, 同时说明该体系对肌酐

的检测不存在干扰(图12中的蓝色线)。在C组实验中,肌酐分子为待测物分子,金纳米粒子则是拉曼信号放大器,可以放大肌酐分子的拉曼信号。同时由于肌酐分子可以吸附到金纳米粒子的表面,且利用NaCl作为团聚剂,使得多个纳米粒子可以有效的团聚在一起,从而进一步放大了金纳米粒子表面肌酐的拉曼信号(图12中的绿色线)。

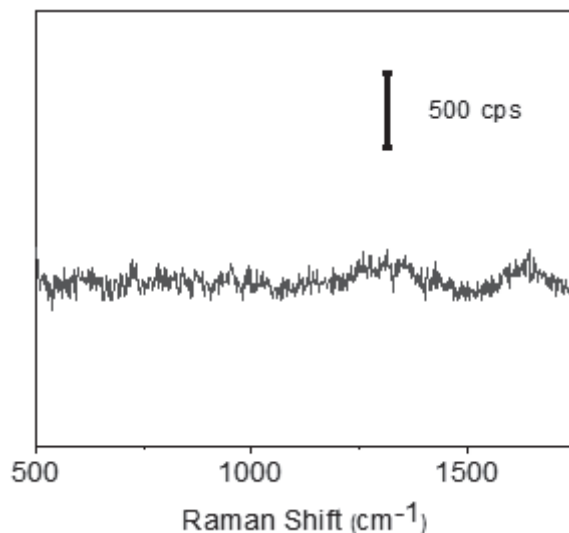


图11 1000 mg·L<sup>-1</sup>的肌酐溶液的拉曼谱图

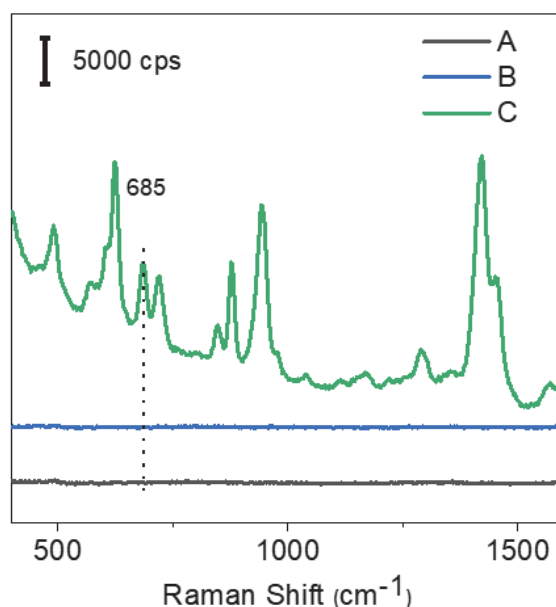


图12 肌酐样品的测试

A: 肌酐溶液(10 mg·L<sup>-1</sup>, 600 μL);

B: 600 μL金纳米溶胶 + 100 μL NaCl (1 mol·L<sup>-1</sup>);

C: 600 μL金纳米溶胶 + 200 μL (10 mg·L<sup>-1</sup>)肌酐溶液 + 100 μL NaCl (1 mol·L<sup>-1</sup>)

本实验的教学总时长约为4个学时。分别包括:教师讲授拉曼光谱的基本原理、仪器结构和功能,以及示范操作1个学时,学生自主操作3学时。每次实验学生人数为4-6位。两人一组,合作操作一台

仪器, 每位学生都可以有效地操作便携式拉曼光谱仪, 便于学生理解便携式拉曼光谱仪的结构和熟悉操作。厦门大学化学化工学院从2021年开始增设拉曼散射光谱法实验, 目前本实验项目已完整实施三轮教学。经过三年的实验教学, 教学实验项目已成熟, 截至目前该实验学生实验完成度达到100%, 学生对该课程评价良好。在2020–2021学年、2021–2022学年、2022–2023学年的期末教学调查中, 分别有94.87%、96.12%、97.25%的学生觉得实验的难度和广度适当, 学习具有挑战性; 94.87%、95.55%、96.27%的学生认为作业量与难度适当, 有挑战性; 95.38%、95.72%、97.06%的学生认为实验提供了足够的资源支持学习, 仪器设备与耗材满足课程需要。从近三年的评价结果可以看出, 该实验的改进效果良好, 得到了越来越多的同学的认可。该实验有效地培养了学生独立操作、团结协作以及根据实验现象进行思考和判断的能力, 并使学生了解到纳米材料的魅力。

## 5 结语

本实验基于如何利用拉曼光谱法进行定性、定量和痕量分析来设计相关实验。具体的实验内容包括让学生学习便携式拉曼仪器的操作、拉曼样品制备、解释拉曼光谱的特征和数据分析等技能。通过本实验教学, 学生能掌握拉曼光谱的相关基本知识, 完成度高。实验中设计不同样品以及不同的实验条件, 培养学生实验设计和计划的能力。进一步的痕量样品测试的实验可以使学生了解到拉曼光谱在科研中的应用潜力, 激发他们继续深入研究拉曼光谱与表面增强拉曼光谱的兴趣。

仪器分析实验中, 许多大型仪器的实验教学存在学生基础知识储备不足、每台仪器操作的学生数较多、机时相对不足等问题。便携式拉曼光谱仪相对于大型台式拉曼光谱仪而言成本低、仪器结构类似、操作简单, 非常适用于教学过程中学生自主操作实验学习, 从而可以从便携式拉曼光谱仪拓展到大型拉曼光谱仪的学习与应用, 有效地提升学生的学习兴趣, 掌握相关理论知识。这样, 既提高了人才培养的质量, 促进科学研究, 也降低了仪器故障率, 保证实验教学高效平稳运行。

## 参 考 文 献

- [1] 刘春梅, 朱艳艳, 张斌. 大学化学, **2022**, 37 (2), 2109103.
- [2] 王伟伟, 吴美瑶, 贾春江. 大学化学, **2023**, 38 (1), 240.
- [3] Zhu, W.; Wen, B.-Y.; Jie, L.-J.; Tian, X.-D.; Yang, Z.-L.; Radjenovic, P. M.; Luo, S.-Y.; Tian, Z.-Q.; Li, J.-F. *Biosens. Bioelectron.* **2020**, 154, 112067.
- [4] 王娜, 刘新月. 实验室科学, **2021**, 24 (1), 123.
- [5] 丁松园, 吴德印, 杨志林, 任斌, 徐昕, 田中群. 高等学校化学学报, **2008**, 29 (12), 2569.
- [6] 王鸿飞, 皇甫一润, 张韦凡, 周亚红. *Open J. Nat. Sci.* **2018**, 6, 132.
- [7] 彭继宇, 宋星霖, 刘飞, 鲍一丹, 何勇. 光谱学与光谱分析, **2016**, 36 (3), 775.