

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX201806011

www.dxhx.pku.edu.cn

## 搭建紫外可见光谱仪并用于科普互动

黄军<sup>1</sup>, 乐永康<sup>2</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 吕占霞<sup>1</sup>, 李维红<sup>1</sup>, 马艳子<sup>1</sup>, 贾莉<sup>1</sup>, 马锴果<sup>1</sup>, 边磊<sup>1</sup>, 赵浩<sup>1</sup>, 关玲<sup>1</sup>, 徐烜峰<sup>1</sup>, 高珍<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 北京大学化学与分子工程学院, 化学国家级实验教学示范中心, 北京 100871

<sup>2</sup> 复旦大学物理教学实验中心, 上海 200433

**摘要:** 搭建科普型可互动紫外可见光谱仪, 将光谱仪的内部构造、光路和光学部件的作用展示出来, 弥补了目前商业化仪器“黑盒子”的弊端。将搭建好的光谱仪与简易物理学光路 and 实际有色饮料样品有机结合, 设计环环相扣的科普互动, 展示出颜色、浓度和光之间的内在联系, 可向不同人群科普化学在生活中的重要性以及分析仪器作为化学学科“放大镜”的必要性。

**关键词:** 搭建; 紫外可见光谱仪; 化学科普

**中图分类号:** G64; O6

## Construction and Application of a Simple UV-Vis Spectrometer

HUANG Jun<sup>1</sup>, LE Yongkang<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, LÜ Zhanxia<sup>1</sup>, LI Weihong<sup>1</sup>, MA Yanzi<sup>1</sup>, JIA Li<sup>1</sup>, MA Kaiguo<sup>1</sup>, BIAN Lei<sup>1</sup>, ZHAO Hao<sup>1</sup>, GUAN Ling<sup>1</sup>, XU Xuanfeng<sup>1</sup>, GAO zhen<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education, College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, P. R. China.

<sup>2</sup> Physics Teaching Lab, Fudan University, Shanghai 200433, P. R. China.

**Abstract:** In this paper, a simple version of UV-Vis spectrometer was constructed to illustrate structure of the spectrometer and the function of the equipment components. Modern UV-Vis spectrometer tends to be present as “black box” that the inner construct is not visible, however, the open UV-Vis spectrometer can solve this problem. Interesting interactive experiments were conducted with this equipment. The inner connections between color, pigment density and optical spectrum were clearly illustrated by measuring colored drinks using the UV-Vis spectrometer. Furthermore, knowledge of chemistry and instrument was well introduced to people of different ages.

**Key Words:** Construction; UV-Vis spectrometer; Science popularization of chemistry

仪器分析作为分析化学中最为重要的分析方法之一, 正成为化学工作者研究物质成分、含量以及结构信息不可或缺的工具<sup>[1]</sup>。特别是近几十年来, 化学的重大发现和突破越来越离不开仪器技术的发展和运用。2011 年 11 月发射的“好奇号”火星探测器搭载有大量的现代分析仪器, 如阿尔法粒子 X 射线分光计、火星样本分析仪(包含质谱仪、气相色谱仪和激光分光计)等, 这些现代分析仪器为探寻火星上的生命元素提供了重要的保证<sup>[2]</sup>。光谱法作为仪器分析的重要分支, 其原理是基于物质的分子或原子在光的辐射作用下, 发生能级跃迁而产生发射或吸收, 测定其波长或强度, 演化为光谱分析方法, 其在研究物质中的分子、原子、离子和电子的相关性质中扮演着重要角色。

收稿: 2018-06-08; 录用: 2018-06-12; 网络发表: 2018-06-14

\*通讯作者, Email: gaozhen@pku.edu.cn

基金资助: 2016 年北京市科学技术普及专项项目

紫外可见吸收光谱作为光谱法中最为常见的一类分析方法,不仅可以进行定性和定量分析,还可以根据吸收峰的特性进行简单的结构分析和物理常数的测定<sup>[5]</sup>,目前已经广泛应用于生产和科研中的定性、定量分析,纯度检测,化合物结构的推测<sup>[6]</sup>以及氢键强度的测定等众多领域。而紫外可见分光光谱仪构造原理简单、应用非常广泛<sup>[7]</sup>,很适合作为科普仪器分析方法的“入门级装备”。然而,为了保证仪器的稳定性、测量结果的准确性以及避免光路系统中杂散光的干扰<sup>[8]</sup>,绝大多数的仪器厂商都会将仪器的各个元件进行固定,并封闭在“黑盒子”里<sup>[9,10]</sup>,不允许操作者拆开进行调整,操作者在整个使用过程中只能看到平面的原理图,并不能了解仪器内部的工作状态和过程<sup>[11]</sup>。为此,设计并定制加工一款科普型的、满足基本准确度和精度要求,可调节、可搭建的光谱仪十分必要。

这款可互动的光谱仪突出强调四方面的特色:1) 核心部分是一个光谱仪,具备市面上销售产品同等质量的分光系统;2) 装置相对简单,可视化强,各个光学元件可移动,可发展为互动型科普仪器;3) 价格明显低于市面上销售的同类型的仪器设备,适合推广;4) 可测定不同类型样品,方便设计出趣味性实验,让化学知识贴近生活,满足不同人群对化学知识的需求。

## 1 光谱仪的结构

根据分光检测类型不同,常见的紫外可见光谱仪可分为传统分光光度计和分光光谱仪<sup>[1]</sup>,这两类仪器在分光检测系统上有明显的区别。前者是将复合光通过单色器(狭缝、透镜以及分光元件)分成单色光,然后单色光通过分析样品后被吸收,测定的是单色光的强度变化;后者是复合光先被分析物质吸收,再通过狭缝、光栅到检测器,获得的是一段波长范围内的光谱强度的变化。分光光谱仪一次分析能够获得更多的样品信息,方便快捷,正在成为越来越多研究者分析未知样品的工具。图1为传统分光光度计和分光光谱仪工作元件组成示意图。

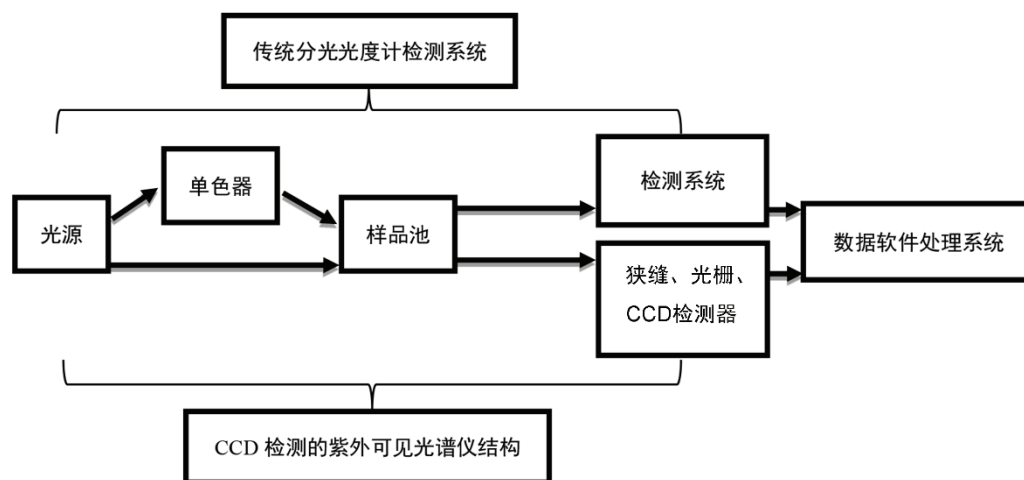


图1 传统分光光度计和紫外可见光谱仪组成示意图

本文中搭建的紫外可见光谱仪主要是按第二种类型结构设计,具有光源、光阑、狭缝、平面镜、凹面镜、光栅和 CCD 检测器等基本配置。它的工作原理是光源发出的光经过光阑调节将光路限制在双凸透镜范围内,双凸透镜将光聚焦在狭缝中,经平面镜反射到凹面镜上,再由凹面镜 1 反射到光栅上进行分光,最后经凹面镜 2 反射到检测器 CCD 上获得信号,如图 2 所示。

## 2 光谱仪的调节和校准

可搭建的光谱仪由于各个光学元件都可以移动,为了保证其稳定性和准确性,需要进行调节和校准。光源发出的光经过若干个光学元件的反射、聚光和分光才能到达 CCD 检测器,然而每一个光学元件都有三个自由度大、不好掌控的参数:水平位置、垂直高度和倾角,它们直接影响光的路径

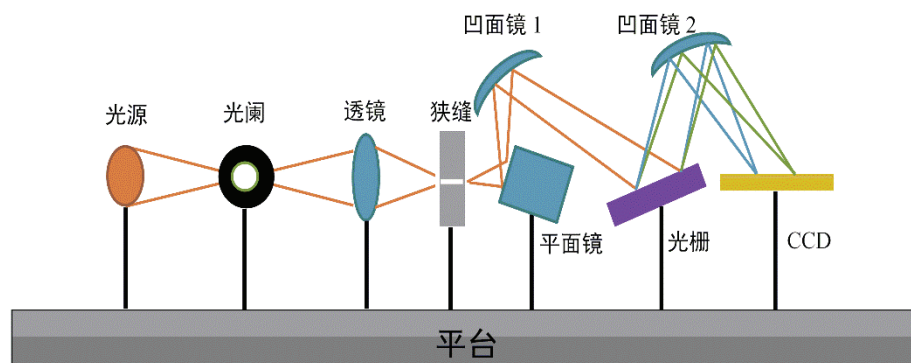


图 2 紫外可见光谱仪光学系统示意图

和强度，需要细致调节。

### 2.1 垂直高度的调节

参照复旦大学乐永康老师的建议和方法<sup>[12]</sup>，利用光强度高、准直性好的激光和光高度计对光学元件进行垂直高度的调节。首先让激光通过两个光高度计上同一个高度的孔，确保激光光源发出的光是水平的；随后将光学元件放入光路中，调节光学元件的支杆高度，使得光斑在光学元件的中心，左右旋转光学元件使反射的光通过光高度计上同一位置的等高孔，如图 3A 所示，这样就实现了反射光学元件高度的调节。球面镜由于本身表面有弧度，因此在调试时只须将激光入射到球面镜中心即可，不一定要使反射后的激光通过等高孔。由于激光的光强很高，直接观测会对眼睛有较大的伤害，在调节过程中均须配戴防紫外线墨镜。

### 2.2 水平位置和倾角的调节

位置和倾角的调节是在高度调节的基础之上完成的。

首先使激光垂直通过入射狭缝，移动平面镜的位置，转动平面镜使光路发生  $90^\circ$  的偏转。在不遮挡和不干扰光路的情况下，放置球面镜，使球面镜距平面镜 10 cm (即平面镜正好放置在球面镜焦点位置上)，旋转球面镜，使激光沿原路返回透射在入射狭缝附近的黑色仪器罩上，光的形状应为点状，从而进一步确认球面镜位置是否合适。为了展现光栅的分光情况以便于调节光栅的位置，此时需要将激光光源更换为白光光源(低压汞灯)，用光高度计直接确定光源的高度，移动光栅使之落在球面镜的焦点处，保持光栅位置不变，旋转球面镜使球面镜的入射光与出射光的夹角尽可能小，同时能将光反射到光栅表面，从而确定光栅的位置，此时在光栅的竖直方向上可观察到彩色分光。第二个球面镜的调节参照第一个球面镜的调节方法，先移动到合适的位置，再旋转球面镜。

CCD 位置和倾角的调节相对简单。只须将 CCD 放置在第二个球面镜反射的光路上，移动 CCD，当观察 CCD 上反射的像最清晰时，即固定 CCD 的位置。一般来说，CCD 的位置也是在球面镜的焦点附近。图 3B 是完成所有调节后的示意图。

### 2.3 波长校准

完成光谱仪的整体光路调节后，还需要对光谱仪进行波长校准或吸光度校准。

锗钨玻璃或钡玻璃具有若干个特征的吸收峰，常被用于紫外可见光谱仪的波长校准，前者适用于可见光区，后者对紫外和可见区都适用<sup>[5]</sup>，但这类方法只适合校准波长不确定度大于 0.2 nm 的仪器，对于波长不确定度小于 0.2 nm 的仪器只能使用原子谱线进行校准。汞原子在 200–700 nm 波长范围内有多条特征吸收谱线，并且这些特征线具有分布均匀、相对强度稳定且波长不随外部环境条件变化而变化等优点<sup>[13]</sup>。本次搭建的光谱仪采用低压汞灯光线光谱进行波长校准，通过调节 CCD 检测器的位置和角度，检测到低压汞灯发出的汞原子的特征谱线，随后选取其中的六条谱线进行计算机线性拟合校准，至此一台精准可用的光谱仪调节完成。

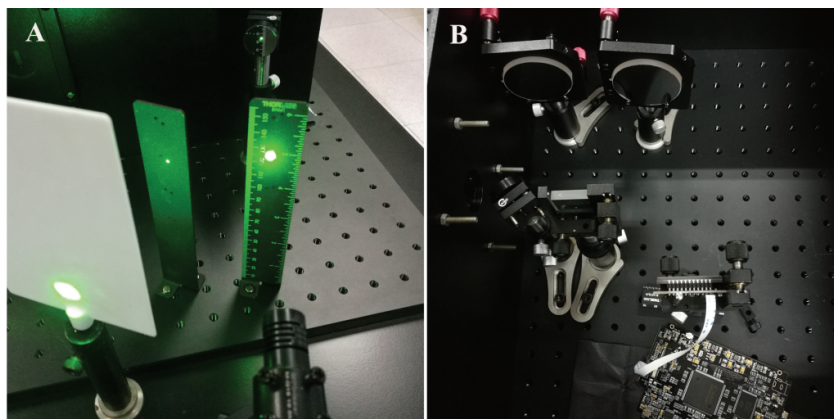


图3 光谱仪的光路调节

A: 用光高度计调节器件高度; B: 调节完成的器件布局图

### 3 设计光谱仪的科普互动环节

可搭建光谱仪在保证仪器稳定性和精度满足科普需要的前提下, 尽量选择简单实用的光学元器件, 不过分追求光栅的分辨率和 CCD 的灵敏度; 在仪器构造上做到开放式, 既可以让操作者观察仪器内部的结构, 也可以自己动手尝试搭建光谱仪, 使其发现各个元器件在光路中承担的功能, 较好地理解光谱仪的工作原理。

在运用光谱仪进行样品测试方面, 根据不同群体自身知识和对事物认知水平的不同, 也进行了有针对性的调整, 满足了不同群体对化学的兴趣<sup>[14,15]</sup>。

#### 3.1 光谱仪用于小学生互动

小学生还未接触太多化学知识, 但他们对未知世界有极强的求知欲, 对于可视化的东西特别好奇。光谱中有一部分内容是可见光谱, 选择这部分内容进行互动, 不仅能够让小小学较好地接受浅显易懂的光谱知识, 同时也能够极大地激发他们的兴趣。不同的溶液之所以产生不同的颜色, 是因为这些溶液能够选择性地吸收不同波长的可见光, 从而展现出人们所看见的未被吸收光的颜色, 由此可以向小学生科普光与颜色的关系, 不同颜色的光具有不同的波长。

为了让小学生安全地参与到化学科普中而不被化学试剂所伤害, 在互动实验环节, 选取了四到六种不同颜色的有色饮料作为分析对象, 观察不同有色饮料对红、黄、蓝三种 LED 灯光的吸收情况, 分析出哪种颜色的饮料对哪种光吸收最强, 如图 4 所示。

从图 4A、4B 和 4C 中可以看出, 使用蓝色 LED 作为光源, 分别放入水、蓝色溶液和黄色溶液, 观察到放入水和蓝色溶液时, 在光屏上两者的光斑强度没有明显差别, 说明蓝色溶液不吸收 LED 发出的蓝色光; 当放入黄色溶液时, 白屏上的光斑强度明显减弱, 说明黄色溶液吸收蓝光。从图 4D、4E 和 4F 中可以看出, 使用红色 LED 作为光源, 放入水和黄色溶液, 在光屏上两者的光斑强度没有明显差别; 当放入蓝色溶液时, 白屏上的光斑强度明显减弱, 说明蓝色溶液吸收红光。通过这样的示例, 非常直观地展现了光谱中补色、吸收等基础概念, 纠正了大部分人认为的“有色溶液会吸收同色光”这一误解。

同时互动环节也可以让小学生们根据三原色原理, 动手调制出自己想要的颜色, 并将调制的有色溶液放入光路中观察光屏上光斑的亮度, 对比调色前后溶液对 LED 灯光的吸收情况。借此向他们介绍颜色与色素的关系, 展示色素对不同颜色的光的吸收情况, 详细介绍颜色与光波长的对映关系, 并揭示调制有色溶液背后的原理。

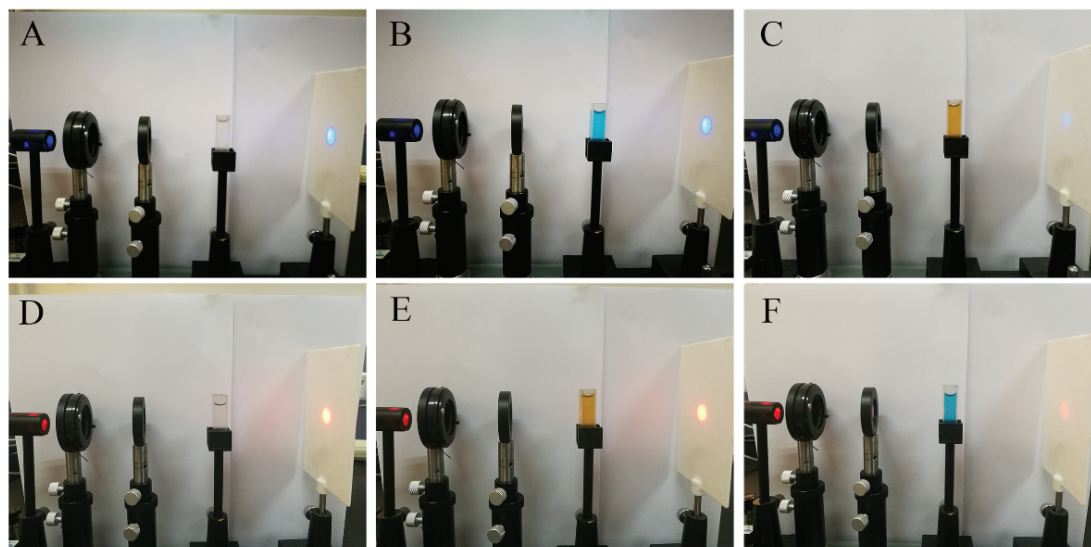


图4 水(A和D)、蓝色溶液(B和F)和黄色溶液(C和E)对蓝光和红光的吸收情况

电子版为彩色

### 3.2 光谱仪用于中学生科普互动

中学生大部分已经具备一定的化学知识基础，已经了解了物质的性质是由其化学成分决定的，而化学成分的真正差别是更微观的化学分子所表现出来的，具有不同化学结构的化学分子具有不同的化学性质。因此在实验中选择三种有色溶液，稀释成不同倍数，并放入到光谱仪的光路中，如图5所示。通过观察不同稀释倍数的溶液对光的吸收情况，从而确定不同色素对光的吸收是有选择性的，并半定量确定有色溶液中色素的浓度，如图6所示。

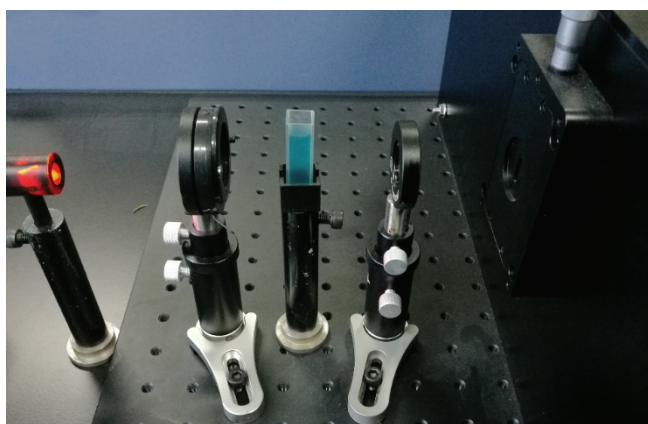


图5 光谱仪对饮料中色素含量的测定

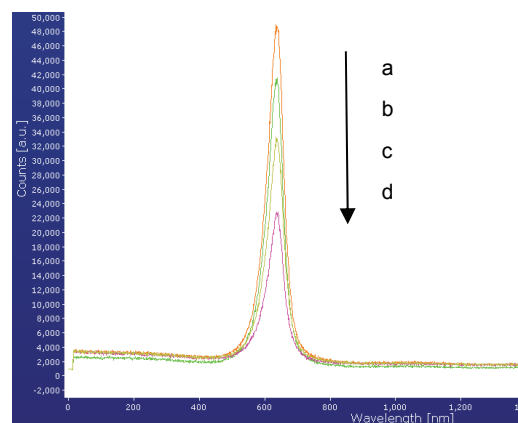


图6 不同浓度的饮料对LED灯的光谱吸收情况

a: 原溶液稀释三倍; b: 原溶液稀释二倍;  
c: 原溶液稀释一倍; d: 原溶液

随后，提供三种色素的分子结构，让中学生观察色素分子结构之间的共性与差异，寻找不同结构对不同光的吸收规律，引导其认识分子结构中吸收光的官能团，科普化学分子吸收光的原理。对于有兴趣的同学，可简单介绍关于分子价电子跃迁导致光吸收的光谱知识。

### 3.3 光谱仪用于社会大众科普互动

对于社会大众，他们对于化学存在很大的误解，这些误解容易掩盖化学在民生、工业和国防中的重要作用。2015年底“我们恨化学”的广告在新闻媒体上传播，一定程度上体现了公众对化学的

错误认识程度。食品安全长期以来受到国人的极大关注,如何让百姓吃的放心、吃的安全是国家和政府一直以来追求的目标。色素作为添加剂在食品中的使用极大地改善了食品的外观、口感和品质,更加丰富了食品的种类。因此色素的用量以及使用方法,得到了人民群众和广大科研工作者的关注。

在互动环节,借助光谱仪,以有色饮料中的色素为分析对象,引导公众正确认识色素所带来的潜在健康安全问题,让公众了解色素在饮料或食品中的含量,用数据结果来纠正公众对色素的错误认识,消除公众对化学的偏见。表1为2017年北京科技周上针对不同对象展示的科普内容。

表1 2017年北京科技周上展示的科普内容

| 人群     | 科普内容                | 科普知识        |
|--------|---------------------|-------------|
| 小学生及以下 | 颜色调制、观察色素对光的吸收      | 色素对光吸收的知识   |
| 中学生    | 比较饮料色素含量、观察色素分子结构差别 | 色素分子结构与光的关系 |
| 社会大众   | 测定有色饮料的含量           | 色素浓度与健康安全   |

实验中,配制一系列不同浓度的标准色素溶液,通过光谱仪测定配制的标准色素溶液的吸光度,根据实验结果绘制一条标准曲线,通过标准曲线获得被测溶液中的色素含量。通过对饮料中色素含量的分析,让大众认识到色素在饮料中含量非常低,只要在国家标准范围内的色素含量,都不会对人体造成危害,让大众放心。

#### 4 结语

这款可视化、可搭建的光谱仪,向大众揭开了光谱仪“黑盒子”里的内部构造,使光谱仪的工作原理更加直观、易懂。将光谱仪应用于食品饮料中色素的测定,通过分析饮料中色素对光的吸收情况,向具备不同程度化学知识基础的人群科普化学知识,帮助人们认识到化学在生产和生活中的重要作用。通过设计完整有趣的互动环节,帮助科普对象认识到仪器作为“放大镜”在化学学科发展中的重要作用,提高了公众的化学素养。本项目与爱猜元素 App<sup>[16]</sup>、动手做护手霜<sup>[17]</sup>和颜色系列展架<sup>[18]</sup>,在全国科技周展示中获得“最受观众喜爱奖”,得到了科普对象的一致认可。

#### 参 考 文 献

- [1] Skoog, D. A.; Holler, F. J.; Crouch, S. R. *Principles of Instrumental Analysis*, 6th ed.; Brooks/Cole: USA, 2006; pp 351–363.
- [2] Wilson, E. *Chem. Eng. News* **2017**, 95 (23), 4.
- [3] Newton, I. *Philos. Trans.* **1671**, 6 (80), 3075.
- [4] Kirchhoff, G.; Bunsen, R. *Philos. Mag.* **1861**, 22 (150), 498.
- [5] 叶宪曾, 张新祥. 仪器分析教程. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 2007: 32.
- [6] 邹建平, 王璐, 曾润生. 有机化合结构分析. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 倪一, 黄梅珍, 袁波, 赵海鹰, 窦晓鸣. 现代科学仪器, **2004**, No. 3, 3.
- [8] 黎海文, 郝鹏, 吴一辉. 光学精密工程, **2011**, 19 (4), 737.
- [9] Bougot-Robin, K.; Paget, J.; Atkins, S. C.; Edel, J. B. *J. Chem. Edu.* **2016**, 93 (7), 1232.
- [10] Wang, J. J.; Rodríguez Núñez, J. R.; Maxwell, E. J.; Algar, W. R. *J. Chem. Edu.* **2016**, 93 (1), 166.
- [11] 万峰, 范世福, 肖松山. 现代科学仪器, **2005**, No. 4, 21.
- [12] 陈思, 柯福顺, 乐永康. 物理实验, **2012**, 32 (3), 44.
- [13] 潘忠泉, 朱波, 张国峰, 王曙光. 化学分析计量, **2003**, No. 1, 45.
- [14] Clippard, C. M. *J. Chem. Edu.* **2016**, 93 (7), 1241.
- [15] 刘浩然. 大学化学, **2017**, 32 (5), 25.
- [16] 马艳子, 马锴果, 高珍, 李维红, 边磊, 赵浩, 黄军, 关玲, 徐烜峰, 贾莉. 大学化学, **2018**, 33 (7), 133.
- [17] 边磊, 徐烜峰, 高珍, 李维红, 高杨, 马艳子, 贾莉, 马锴果, 赵浩, 黄军, 关玲. 大学化学, **2018**, 33 (7), 138.
- [18] 马锴果, 贾莉, 马艳子, 高珍, 李维红, 边磊, 黄军, 关玲, 徐烜峰, 赵浩. 大学化学, **2018**, 33 (7), 129.