

开放式仪器分析教学实验设计——基于LEGO积木的模块化激光诱导荧光检测系统的构建

潘建章^{1,2,*}, 张梦婷¹, 张箫扬¹, 廖育城¹, 徐欣然¹, 方群^{1,2,*}

¹浙江大学化学系, 杭州 310058

²浙江大学杭州国际科创中心, 杭州 311200

摘要: 基于市售乐高(LEGO)积木和3D打印积木构建的光学模块, 发展了适用于本科生仪器分析教学实验的模块化激光诱导荧光(Laser induced fluorescence, LIF)检测系统。将该系统的构建过程引入本科生仪器分析的实验教学中, 指导学生基于不同功能的积木块, 实现LIF系统的组装和搭建, 并应用于对荧光素钠溶液浓度的测定。该系统具有成本低、易构建、操作灵活等特点, 模块化的构建形式大大降低了仪器搭建门槛, 即使没有前期经验的本科生也可在3 h内搭建完成。将模块化构建思想引入开放式教学环节, 可激发学生对仪器分析课程的兴趣和热情, 同时有助于加深学生对荧光分析原理和LIF检测系统结构的理解, 在系统构建过程中还能锻炼学生的动手能力, 提高学生发现问题和解决问题的能力。

关键词: 激光诱导荧光检测; 模块化设计; 乐高积木; 3D打印; 开放式教学

中图分类号: G64; O6

Open Laboratory Teaching Design of Instrumental Analysis: Construction of a Modular Laser-Induced Fluorescence Detection System Based on LEGO Blocks

Jianzhang Pan^{1,2,*}, Mengting Zhang¹, Xiaoyang Zhang¹, Yucheng Liao¹, Xinran Xu¹, Qun Fang^{1,2,*}

¹ Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China.

² Hangzhou International Science and Innovation Center of Zhejiang University, Hangzhou 311200, China.

Abstract: In this work, a modular Laser-induced fluorescence (LIF) detection system LEGO LIF for undergraduate laboratory course was developed based on optical modules constructed from commercially available LEGO blocks and 3D-printed blocks. The system was applied to the laboratory teaching of undergraduate instrumental analysis, and the students were instructed to build the LIF system based on functional building blocks and apply it to the determination of sodium fluorescein solutions. The system is characterized by low cost, easy construction and flexible operation. The way of modular construction greatly reduced the threshold of instrument construction, and can be completed within 3 h by undergraduate students without experience. The introduction of the LIF modular construction design into the open teaching session can inspire students' interest and enthusiasm in the instrumental analysis course, and help deepen students' understanding of fluorescence analysis principles and LIF detection system structure, exercise students' hands-on ability as well as improve students' ability to find and solve problems during the process of system construction.

收稿: 2023-01-26; 录用: 2023-03-09; 网络发表: 2023-03-29

*通讯作者, Emails: fangqun@zju.edu.cn (方群); kelvonpan@zju.edu.cn (潘建章)

基金资助: 浙江省“领雁”研发攻关计划(2022C10140); 国家自然科学基金(21974122, 21827806, 2234007)

Key Words: Laser-induced fluorescence detector; Modular design; LEGO blocks; 3D printing; Open teaching

1 引言

荧光分析是本科生分析化学课程中重要的学习内容,以往的荧光分析法教学实验主要采用商品化荧光光谱仪进行,学生操作集中于样品配制与荧光测定环节,过程相对简单,仪器的内部结构对于学生相当于一个黑箱。课程结束后学生普遍存在印象不深、原理掌握不扎实的情况。如果将实验从单纯的荧光测定环节改进为从学生自己动手搭建仪器,再到评估仪器性能,最终再将仪器用于样品荧光测定,则可以极大地提高实验的趣味性,锻炼学生的动手能力,又打开了黑箱,实现从了解基本科学原理到构建分析仪器的跨越。

激光诱导荧光检测(LIF)是最灵敏的光学检测技术之一,其检测限度可以达到亚皮摩尔级^[1,2],是荧光分析法的重要组成部分。LIF检测毛细管电泳技术成为了基因测序的金标准,LIF还可与流式细胞仪和高效液相色谱仪(HPLC)结合作为在线检测器使用^[3-5],目前LIF检测技术已成功应用于氨基酸、脂类、多糖、肽、蛋白质和核酸的分离分析及细菌细胞等微粒的分选分析^[6-9],是当今生命科学领域应用最广泛的检测技术之一。

但是,LIF系统属于精密光学仪器,体积大、构建成本高,通常需要在光学实验室内进行搭建,依靠精密的机械部件进行光路的调校,因此存在系统成本高、搭建耗时长、装配和光路调校难度大等问题。乐高积木以其结构精度高、组装方便灵活等特点著称。近年来,已有一些研究报道将乐高积木用于构建低成本设备和实验教学仪器^[10-13]。

作者研究组自2013年起,在浙江大学化学求是班仪器分析教学中,尝试将积木模块化的概念应用于LIF系统的构建实验。在后续多年的实验中,根据实验中出现的問題,我们不断地对系统的结构、搭建方法、性能评估方法,以及实验教学方法进行针对性的优化和改进^[14],已形成一套完整的适合于本科生实验教学的系统和教学方案。该系统利用乐高和3D打印的功能积木块,构建微型化的LIF系统,具有成本低、易构建、操作灵活等特点,其实验开放性和趣味性强,在最近几年的教学实践中,均获得参加实验学生的好评。

2 实验部分

2.1 试剂和材料

试剂:荧光素钠(上海生工,分析纯),去离子水。实验前,用天平准确称取荧光素钠适量,加水溶解,制成 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 荧光素钠的储备溶液。用去离子水逐级稀释 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 荧光素钠原液至 $1.00 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,备用。浓度低于 $1.00 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的荧光素钠宜现配现用,在实验开始前1 h,再由助教将 $1.00 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 溶液逐级稀释,得到系列浓度荧光素钠溶液。

零件:LEGO积木(LEGO,丹麦),3D打印积木(三维猴,深圳),透明紫外熔融石英毛细管(锐沣,河北),迷你隔膜泵(Kamoer,上海),450 nm激光器(PL450B,欧司朗,德国),DM505二向分色镜(汇博光学,沈阳),聚焦透镜(焦距8 mm,1.0 NA,雷迈电子,广州),滤光片(BP525,汇博光学,沈阳),光电二极管(S8745-01,滨松光电,日本),自制控制电路板。

2.2 共焦激光诱导荧光检测系统的光路结构和模块

模块化LIF检测系统光路结构如图1所示。系统由激光二极管光源、滤光片、二向分色镜、两个聚焦透镜、光电二极管检测器构成。波长450 nm的激光二极管作为光源水平放置,激光束被505 nm二向分色镜反射至垂直方向,经聚焦透镜聚焦到毛细管通道的中央,焦点处的激光斑点激发毛细管内样品溶液的荧光分子。荧光分子发出的荧光,经同一聚焦透镜收集后,沿垂直方向向下通过二向分色镜,再经525 nm带通滤光片滤除干扰光线,最后经底部的荧光汇聚透镜后,到达检测模块的光电二极管,荧光被光电二极管转换为电信号后由控制电路采集并保存。

常规LEGO积木的最小标准构建单元的长宽高为8 mm × 8 mm × 3.2 mm,因此本工作所有的

LEGO积木均基于该基本单元进行尺寸的描述。为实现光学原件的积木式结合,工作中进一步设计了定制化积木,并采用3D打印技术进行了加工,以固定光源、透镜、毛细管、二向分色镜和检测器。这些积木使用聚乳酸材料(PLA)制作,这些模块同样采用LEGO积木的标准进行尺寸描述,这些PLA积木底部采用了与LEGO积木相同的插拔式结构,因此可与LEGO积木之间实现精密匹配和固定。

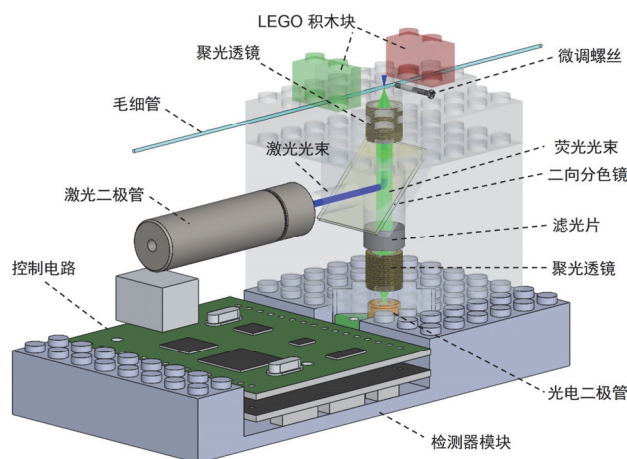


图1 模块化LIF系统的光路结构图

光源模块(图2A)包括一个激光二极管及其固定块。固定块包括一个 $8 \times 4 \times 6$ 单元底座和一个 $8 \times 4 \times 3$ 单元盖板,在底座的中心设计有直径12.9 mm、长19 mm的圆柱形空腔,用于固定激光二极管。底座的前后端留有两个小孔,以引出激光束和电源线。

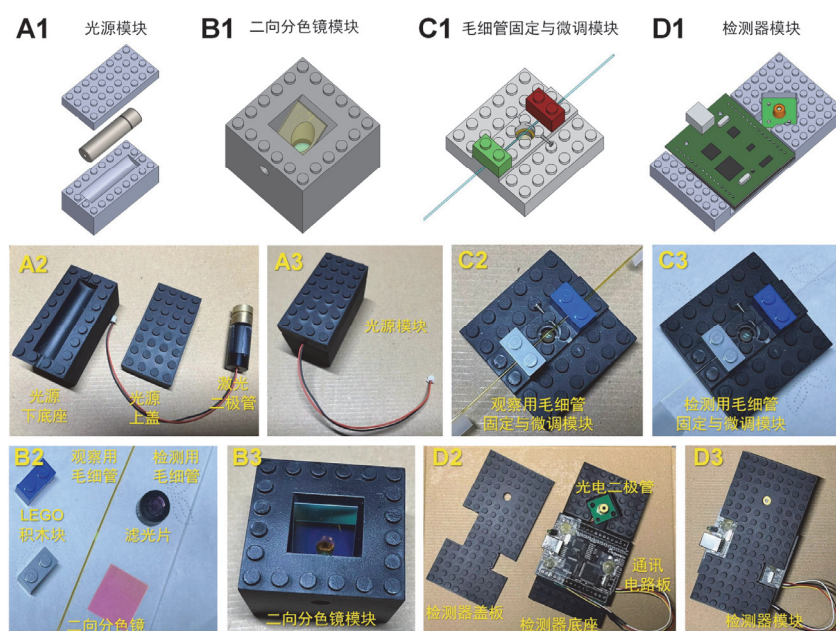


图2 基于乐高积木和3D打印积木相结合构建的LIF光学模块

- (A) 光源模块, 包括光源模块示意图(A1)、实物零件图(A2)和装配图(A3); (B) 二向分色镜模块, 包括模块示意图(B1)、实物零件图(B2)和装配图(B3); (C) 毛细管固定与微调模块, 包括模块示意图(C1)、观察用毛细管与模块实物装配图(C2)、检测用毛细管与模块实物装配图(C3); (D) 检测器模块, 包括模块示意图(D1)、实物零件图(D2)和装配图(D3)

二向分色镜模块(图2B)用于分离入射到样品溶液的激光束和样品溶液发出的荧光,它包括具有 45° 斜面的 $6 \times 6 \times 12$ 单元积木块和固定于斜面上的二向分色镜(505 nm, DM505, 汇博光学, 沈阳),二向分色镜正下方依次安装荧光窄带滤光片(525 nm带通, BP525, 汇博光学, 沈阳)和荧光汇聚透镜(焦距8 mm, 1.0 NA, 雷迈电子, 广州)。该积木块的中心垂直方向底部留有深度为12 mm的M9螺纹孔,用于固定和调节底部的荧光汇聚透镜,螺纹孔上方为直径10 mm的通光孔。

毛细管固定与微调模块(图2C)用于固定激光聚焦透镜(1.0 NA, 雷迈电子, 广州)和快速固定与调节毛细管,下半部分 $8 \times 4 \times 3$ 单元积木中心留有螺纹孔(M9 $\times$ 0.5 mm),带同样规格外螺纹的聚焦透镜可以通过旋转实现上下位置的移动,以实现垂直方向上激光束在毛细管通道中心的聚焦。毛细管固定部分用于快速固定毛细管,由 $2 \times 6 \times 3$ 单元的底板和4个 $1 \times 2 \times 1$ 单元乐高块组成。底板的中心开有直径9 mm的通孔,用于通过激发光和荧光;在板侧面的小圆柱上打孔安装一个M1.2的小螺丝,螺丝前端顶在毛细管侧面,通过旋转该螺丝可微调毛细管的水平位置,以实现激光束在水平面到毛细管通道中心的对准。

检测器模块(图2D)用于安装光电二极管检测器,由大小两个腔体构成,小腔体(约 $3 \times 3 \times 2$)用于安装光电二极管(S8745-01, 滨松光电, 日本滨松),大腔体($8 \times 8 \times 2$)用于固定控制电路板,上方配有薄积木板上盖。

2.3 实验教学步骤和方法

2.3.1 实验前分组及助教培训

根据以往数年的经验,为保证实验效率和教学效果,通常将参加实验的学生分为2-4人一组,并为每组配备研究生助教一名。在正式实验前,还需组织各组的助教按照实验流程进行预先培训,使每名助教均具有能够自行搭建系统完成实验的能力,并能解决实验中经常出现的问题。

2.3.2 实验原理和操作讲解

课堂上,正式搭建系统前,由一名助教根据实验教学安排,采用PPT讲解的方式,介绍实验目的、实验原理、实验操作、数据处理、结果分析与实验报告撰写等内容。

2.3.3 模块化LIF系统搭建及荧光观察

由助教指导学生使用提供的实验材料搭建模块化LIF系统(图3),并对其荧光光路进行观察。

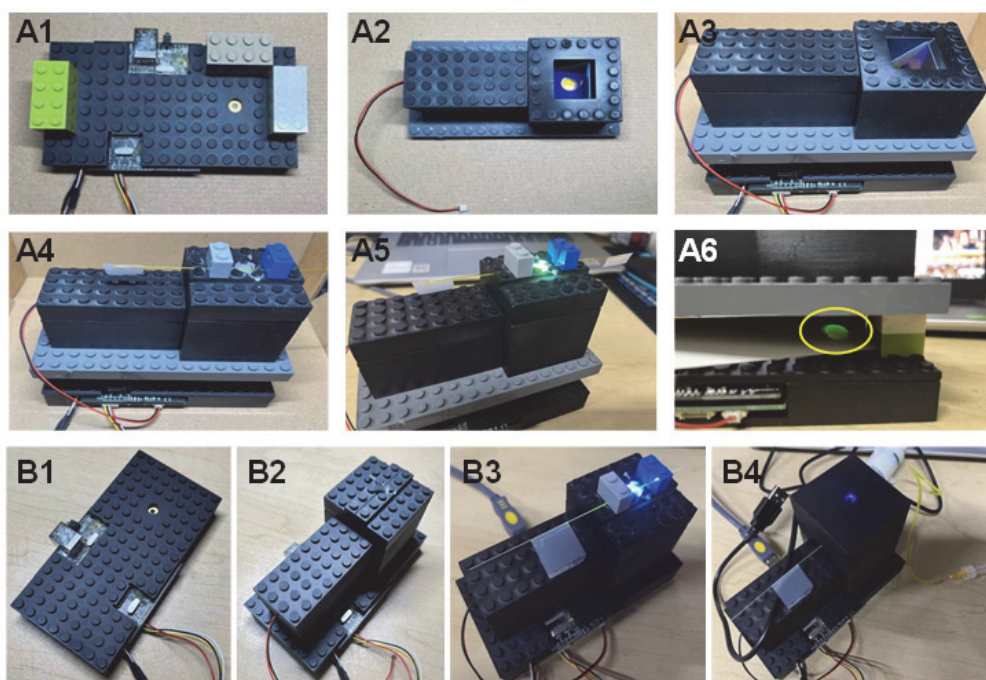


图3 荧光观察光路(A1-A6)与LIF系统(B1-B4)搭建流程

(1) 将光电二极管模块安装在底层, 并在其上放置多个LEGO积木块(图3A1)。将光源模块和二向分色镜模块固定在一块底部有4 mm通光孔的 $8 \times 16 \times 3$ LEGO积木底板上(图3A2)。

(2) 将3A2模块直接安放在3A1模块上方(图3A3), 利用积木的结构定位功能即可实现光路的对齐。

(3) 聚焦透镜和毛细管固定与微调模块安装在二向分色镜模块的上方, 聚焦透镜与二向分色镜的中心对齐, 毛细管与透镜中心对齐(图3A4)。

(4) 系统构建完成后, 连接电源, 实验人员戴上护目镜, 点亮激光器, 在毛细管固定积木上安装固定预充有 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 荧光素钠溶液的观察用毛细管, 即可观察到毛细管通道内荧光素钠溶液受激光激发处有荧光发出(图3A5)。

(5) 在检测器检测窗口上方倾斜放置一小块白纸片, 可以观察到明显的黄绿色荧光斑点(图3A6)。

2.3.4 模块化LIF系统调试

系统荧光光路观察完毕后, 将为方便观察用于架高的LEGO积木部分拆除, 并将流体动力部分连接好, 即构成完整的模块化LIF系统, 搭建过程示意如图3B1–3B4。

取一根长度为16 cm的具有透明涂层的熔融石英毛细管(内径 $150 \mu\text{m}$, 外径 $375 \mu\text{m}$), 将其固定在毛细管固定模块上, 使用Tygon管(内径 $190 \mu\text{m}$)、注射器针头、鲁尔接头和软管, 将毛细管与迷你隔膜泵连接起来, 构成流路系统(如图4)。取一块宽4 mm、长15 mm的半透明胶带, 沿着激光束方向上下移动, 找到胶带上最小、最亮的激光点的位置, 确定激光焦点的位置。然后, 旋转位于聚光透镜模块上的聚光透镜, 将其焦点高度调整到毛细管固定积木的上表面, 并将毛细管放在毛细管固定积木上, 用4块乐高积木块压紧。毛细管固定后, 启动迷你隔膜泵将 $1.00 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的荧光素钠溶液抽过毛细管, 并通过旋转毛细管固定板一侧的小螺丝来微调毛细管的水平位置, 直至获得最大的荧光信号。在实验室自行编写的LabVIEW程序的控制下, 光电二极管检测到的荧光信号被实时显示在笔记本电脑屏幕上, 同时以文件的形式记录下来, 用于后期的数据处理和分析。



图4 模块化LIF系统中的流路组件

(A) 迷你隔膜泵、软管、鲁尔接头、注射器针头、Tygon管实物图; (B) 检测用毛细管与流路组件连接实物装配图

2.3.5 荧光素钠标准曲线的测定

将不同浓度的荧光素钠标准溶液引入LIF系统进行检测, 记录数据, 绘制标准曲线, 计算待测样品溶液中荧光素钠浓度。

实验提供了 1.00×10^{-5} 、 1.00×10^{-6} 、 1.00×10^{-7} 、 1.00×10^{-8} 、 2.00×10^{-6} 、 4.00×10^{-6} 、 6.00×10^{-6} 、 8.00×10^{-6} 、 2.00×10^{-7} 、 4.00×10^{-7} 、 6.00×10^{-7} 、 8.00×10^{-7} 、 2.00×10^{-8} 、 4.00×10^{-8} 、 6.00×10^{-8} 、

$8.00 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 等多个不同浓度的荧光素钠标准溶液。建议学生先将 1.00×10^{-5} 、 1.00×10^{-6} 、 1.00×10^{-7} 、 $1.00 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液,按照浓度梯度由低到高依次检测,以确定合适的增益范围和所构建装置的大致检测限水平;再在检测限的量级附近,选择合适的细分浓度的荧光素钠溶液,进行标准曲线的测定与线性范围和检测限的计算。为了避免不同浓度溶液之间的交叉污染,在引入新样品之前,须先吸入去离子水清洗毛细管管路,直至荧光信号回归到空白基线水平。建议每一浓度样品采集至少3条数据,每条数据不少于2000点(采集速率500 Hz),标准曲线的线性回归方程构建须不少于5个浓度点(不包括空白)的数据。系统检测限按三倍空白溶液响应信号的标准偏差对应的浓度计算。此外,实验过程中还需注意监测空白溶液的多套数据间的变化,以确定系统的稳定性和重复性,判断所采集数据的可靠性。

2.4 安全提示

实验中使用的所有激光器的强度均控制在4 mW光功率以下,符合I类激光器的安全标准,不会对人体造成伤害。为防止意外,实验中每位学生仍需佩戴激光防护眼镜。

3 结果与讨论

3.1 模块化LIF系统的设计

本工作的目的是发展一个适用于本科生实验教学的模块化LIF检测系统,该系统可以很容易地通过不同功能模块的灵活组装构建。在此基础上,建立一套基于该系统的开放式实验教学方案。

LEGO积木以其结构精度高(定位精度达20 μm 级)、组装简单、灵活而闻名。近年来,LEGO积木在构建低成本的科学仪器和设备中的应用已被报道^[10-13]。基于这些特点和应用,在构建LIF系统的早期尝试中,我们选择商品化LEGO积木块作为构建系统的基本结构单元,利用胶粘剂将LIF系统光学元件固定在不同的LEGO积木块上构成功能模块。然而,由于LIF检测系统是一种结构复杂的光电仪器设备,在后续的实验教学中,我们注意到仅依靠商品化LEGO积木块很难实现LIF系统光学元件的精准、可靠固定和组装。因此,我们采用3D打印技术为光学元件设计制作特殊的固定积木块。这些3D打印的积木块一方面可以与激光二极管、准直透镜、滤光片、二向分色镜、光电二极管等光学元件匹配固定形成整体光学模块,另一方面它们使用与LEGO积木块相同的插拔定位结构,可实现光学模块与其他积木块的快速组合和光学模块间的快速初定位,定位精度达到30 μm 左右。

将激光聚焦点对准毛细管通道的中心是保证LIF系统获得高检测灵敏度的关键。模块化LIF系统除了通过直接装配积木块实现光路的初对准外,在激光对焦方面还需要更为精密的微调机构和对准方法。在文献报道的LIF系统中,通常需要在专业的光学平台上进行光学调节,并采用视觉和实时成像聚焦^[15]、激光辐射温度测量^[16]和显微镜焦平面对准^[17]等激光光斑对准方法,这些系统通常需要使用复杂的测量仪器,且对准操作过程较为繁琐和耗时。

在本系统中,我们先采用目视判断来确定激光最小斑点位置进行初始聚焦,再通过监测系统聚焦过程中的荧光信号变化,实现更为精准的聚焦。我们在聚焦透镜固定积木上设计了与M9带0.5 mm螺距聚焦透镜匹配的螺纹,因此可以通过旋转透镜来微调激光聚焦斑点在毛细管内垂直方向上的高度。同时沿激光束垂直方向上下移动尺寸为4 mm $\times$ 15 mm的半透明磨砂胶带,在胶带上可以观察到最小最亮的激光光斑,该处即为激光束焦点的垂直位置,轻旋聚光透镜,使光斑焦点与毛细管固定积木表面高度一致,可实现光斑的初始聚焦。然后将毛细管固定在定位积木上,在积木的侧面安装一个可在1 mm的水平范围内微调毛细管位置的小螺钉,调节过程中,开启配套的检测软件,通过边调边监测毛细管内荧光染料的荧光信号,直至信号最强,此时激光聚焦光斑已处于毛细管通道的中心。与传统的基于光学平台的调整方法相比,上述微调装置和方法具有器件尺寸小、成本低、操作简单、方便快捷等优点。该方法获得的焦点对准精度可与用成像相机或显微镜等专业设备获得的精度相媲美,且对非专业人员更为友好。

3.2 模块化LIF检测系统性能评价

采用不同浓度的荧光素钠溶液作为样品溶液, 考察模块化LIF系统的检测性能。图5为一个典型模块化LIF系统进行系统测试时获得的荧光素钠标准系列溶液的荧光信号和标准曲线, 系统对荧光素钠溶液在150 μm 内径毛细管中的检测限为 $7.40 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($S/N = 3$)。系统对浓度分别为 2.00×10^{-7} 、 4.00×10^{-7} 和 $8.00 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 荧光素钠溶液样品的荧光强度进行重复测定, 测定结果的相对标准偏差(RSD, $n = 6$)均不大于1.9%, 表明该模块化LIF系统具有良好的检测精密性。

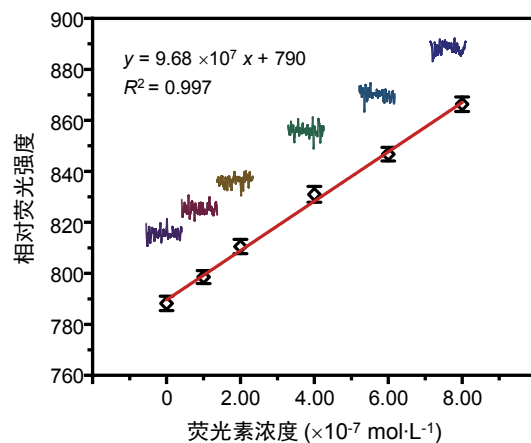


图5 荧光素钠标准系列溶液的荧光信号和标准曲线

3.3 模块化LIF系统在教学实验中的应用

鉴于本LIF系统的模块化易搭建和低成本优势, 自2013年起, 我们将其引入本科生仪器分析实验教学中。至今, 已面向浙江大学化学系二年级求是班本科生开展了6次教学实验(图6)。在这些实验中, 不断对系统模块的结构、系统构建方法、测试方式和实验流程进行优化和改进。



图6 历年模块化LIF系统本科生实验教学现场照片

在二向分色镜模块结构方面,早期是将二向分色镜用双面胶带固定在两个有 45° 倾斜面的商品化LEGO积木块上。这一方法易出现二向分色镜粘贴不牢固,以及粘贴后易因触碰而发生角度偏移等问题。其后我们采用3D打印技术加工带有 45° 斜面的积木块,但该积木的左右两侧不封闭,依然容易出现镜片在装置移动时滑落或错位等问题。在本文中,模块在两侧具有封闭的结构,就避免了上述不足。在聚光镜模块结构方面,早期的聚光镜固定方式是在一个 $4 \times 4 \times 2$ 的薄LEGO积木中央打孔、攻丝,制作聚光镜固定位。与本文中使用的聚光镜模块相比,该固定方式存在聚光镜固定不牢、中心易偏离、薄LEGO积木块与下方光路固定不牢等问题。在毛细管固定方面,以往的方法是在一块中央钻有4 mm通光孔的 $2 \times 4 \times 1$ 的LEGO积木块上,使用4个 $2 \times 1 \times 1$ 的小积木块压住毛细管,并使用侧面的小螺丝对毛细管水平位置进行微调。虽然这一方法毛细管位置调节较为灵活,但是依然存在毛细管固定位置容易偏离的问题。我们曾尝试采用在小积木块的一条边切削出一个小倒角,或者3D打印制作具有V形槽的积木等方法进行改进,但依然不能完全解决毛细管固定与位置微调的问题。最终我们使用在固定积木上设计加工微槽与小螺丝微调相结合的方法解决上述问题,获得良好的固定稳定性与调节灵活性。检测器模块是封装在一个3D打印的小积木中,其结构设计经历了胶粘剂固定、模块化拔插结构固定、侧面封装至底板积木,再到本文中的使用螺丝固定在底板积木这四个阶段。在这一过程中,逐步解决了胶粘定位差、拔插不牢固、侧面封装检修不方便等问题。此外,将检测器结构部分裸露出来,还可以让学生看见真实的电子元件外观,更有真实感。

除上述结构改进外,我们还在其他器件和实验方法上有了一些改进提升。在以往的实验中,使用石英毛细管外壁有一层棕色的聚酰亚胺保护涂层,在使用前,通常需要用打火机烧去一小段涂层,以露出检测窗口。而这部分去除了涂层的石英毛细管会变得十分脆弱,很容易在实验过程中被折断,对实验效果和成功率有较大影响。最终,我们选用了一种有透明涂层且涂层可透过紫外光的商品化石英毛细管,作为检测通道,大大提高了实验效率,也方便了学生对毛细管通道的观察。此外,我们还使用迷你隔膜泵代替注射器作为进样实验中流体的驱动源,以解决实验中因操作者对注射器中压力状态判断不准确致使样品流速和检测信号波动较大的问题。

经过上述改进和优化后,目前,大部分参与实验的学生都可以在3 h内完成模块化LIF系统的构建和性能测试。基于模块化LIF系统的开放式教学模式,使得学生在构建系统的过程中,能够加深对荧光分析原理和LIF检测系统结构的理解,同时也能提高学生的动手能力和发现问题、解决问题的能力。这种探索性实验还可以显著激发学生学习仪器分析的兴趣和热情。此外,为了进一步增强学生的创新意识,在实验过程中,我们也鼓励学生利用所提供的积木块,进一步尝试各种不同的积木组合,建立不同光学结构和配置的模块化LIF系统。在多年的教学实践中,上述实验获得了参与学生们的好评,他们表示“没有传统无机、有机实验的枯燥,也不像仪器分析实验一样点几个按钮就出来结果,很有参与感”“这样的创新,是一种激励我们自己动手对实验仪器进行创新性改造,从而实现自己想要达到的目标要求,而不是简单接受别人告诉你的工作方法定式”“第一次自主拼装了一个可以用于实际检测荧光的仪器,对我而言十分新奇,只需要为数不多的几件物品和手掌大小的仪器便可组装出检测限低至 10^{-8} 数量级的检测装置,之前闻所未闻”“考虑到不同仪器原理和分析环境要求不同,虽然目前不太可能把所有分析仪器都以这种形式制成模块化教学版,但这肯定是值得继续探索的一条新路”。

4 结语

在本工作中,我们发展了基于LEGO和3D打印积木的模块化激光诱导荧光检测系统,并将其引入到开放式本科生仪器分析实验教学中,获得良好的教学效果。该模块化LIF系统具有结构简单、成本低廉、易于搭建、使用灵活等特点。模块化设计大大降低了仪器的搭建门槛,使得之前没有经验的学生根据操作流程也能够在规定时间内完成具有高灵敏检测性能的LIF系统的构建。这种依靠定制化和商品化模块积木组装高端分析仪器的实验形式为仪器分析实验教学的模式创新提供了新的路

径。类似的思路,未来还可以应用到其他类型分析仪器的快速构建,如吸收光度分析、毛细管电泳、流动注射分析系统,甚至高效液相色谱系统等。此外,因其检测灵敏度、体积和成本方面的优势,本文所发展的模块化LIF系统不仅能够应用于分析化学教学实验,还可以作为高灵敏检测器应用于常规分析系统中,如激光诱导荧光检测-毛细管电泳系统。

5 创新性/特点/特色声明

构建基于LEGO积木和3D打印积木块的模块化激光诱导荧光检测系统;
模块化LIF系统结构简单,构建方便,被应用于本科生仪器分析实验教学中。

参 考 文 献

- [1] Xi, Q. Y.; Shi, M.; Geng, X. H.; Wang, X. N.; Guan, Y. F. *Anal. Chem.* **2020**, 92 (13), 8680.
- [2] Zhang, W. M.; Liu, L.; Zhang, Q.; Zhang, D. T.; Hu, Q.; Wang, Y. N.; Wang, X. Y.; Pu, Q. S.; Guo, G. S. *Chem. Commun. (Camb.)* **2020**, 56 (16), 2423.
- [3] Xesús, F.; Beatriz, I. V.; Antonio, I.; Jesús C.; Cristina, A. F.; Alberto, C. *Food Anal. Methods* **2010**, 3 (3), 138.
- [4] Takashi, K. *Chem. Rec.* **2019**, 19, 452.
- [5] Zhu, X. R.; Liu, B. X.; Su, S. S.; Wang, B.; Bai, Y.; Huang, H. W.; Liu, X. B.; Cheng, X.; Wang, X. H.; Zhu, L. X.; *et al. Talanta* **2020**, 206, 120200.
- [6] Fang, B. Y.; Yao, M. H.; Wang, C. Y.; Wang, C. Y.; Zhao, Y. D.; Chen, F. *Colloids Surf. B Biointerfaces* **2016**, 140, 233.
- [7] Peng, X. D.; Xu, D. H.; Xue, J. J.; Mei, X. T.; Lv, J. Y.; Xu, S. B. *Int. J. Pharm.* **2007**, 337, 25.
- [8] Arabi, D. S.; Abdel-Salam, Z. A.; Goda, H. A.; Harith, M. A. *J. Lumin.* **2018**, 194, 594.
- [9] Fang, X. X.; Li, H. Y.; Pan, J. Z.; Fang, Q. *Talanta* **2016**, 150, 135.
- [10] Haverkamp, N.; Holz, C.; Ubben, M.; Pusch, A. *Phys. Teach.* **2020**, 58 (9), 652.
- [11] Théo, L.; Jasmine, S. F.; Myriam, T.; Hung, V. P.; Peter, C. H.; Thanh, D. M. *Anal. Chem. Acta* **2020**, 1135, 47.
- [12] Alexander, A. B.; Sarah, R. M.; Hyun, H. J.; Pedro, M.; Leo, A. J.; Edward, M. M.; Christopher, J. W.; Eric, V. A. *J. Org. Chem.* **2020**, 85 (15), 9447.
- [13] Marco, C.; James, T. L.; Monique, S. S.; Cassandra, L. Q. *Anal. Chem.* **2020**, 92 (2), 1687.
- [14] Zhang, M. T.; Peng, Y. M.; Pan, J. Z.; Fang, X. X.; Li, H. Y.; Zhang, X. Y.; Liao, Y. C.; Yao, J. K.; Wu, M. L.; Yao, Y. Y.; *et al. Talanta* **2022**, 239, 123063.
- [15] Jung, R. R.; Tae, Y. D. *IEEE Trans. Consumr. Electro.* **2016**, 62 (2), 144.
- [16] Ren, K.; Liu, S. Y.; Xie, X. F.; Du, H. B.; Hou, L. F.; Jing, L. F.; Yang, D.; Zhao, Y.; Yan, J.; Yang, Z. W.; *et al. J. Sci. Rep.* **2019**, 9, 5050.
- [17] Peng, Y. M.; Pan, J. Z.; Fang, Q. *Talanta* **2021**, 230, 122329.