

# 物理实验中培养学生从原理到仪器的思维\*

——以衍射光栅实验为例

吕昭月 李明达 谢湘华

(华东理工大学理学院 上海 200237)

(收稿日期:2019-12-26)

**摘要:**为使物理实验教学适应新时代人才培养目标,以衍射光栅实验为例,适当调整教学环节,使教学活动形成“光栅原理→光栅衍射实验→光谱仪→光谱仪的应用”模块化闭环体系,强化学生的系统性思维、从原理到仪器的思维等,实现从知识到能力的进阶,提升人才培养质量.光谱仪的应用教学内容为测量手机显示屏白屏光谱,增强实验的趣味性和多样性,充分调动学生积极性,对手机光谱进行高斯分解,解析其色域和显示原理,专业技术教育悄然融入.解析不同时期的手机显示屏,还能展现显示技术的进步和发展.

**关键词:**仪器制造思维 系统性思维 光谱分析 显示技术

新时代背景下,对人才培养提出了新的要求,不仅是传授知识,更为重要的是培养能力,为此,高等教育工作者不断探索和实践如何培养新时代人才.物理实验是理工科基础必修课,是知识到能力的重要实践教学环节,是培养学生创新能力的绝佳课堂,在工程教育中具有不可替代的地位和作用.如何开展物理实验教学使之更好地匹配新时代人才培养体系是广大物理教师必须深入思考的问题<sup>[1,2]</sup>.

新时代新工科更注重学生思维和能力的培养,使学生在未来工程设计、研发、制作等工程实践中能够运用恰当的思维解决实际问题,如系统性、创新性、仪器制造等思维和能力.基于此,本文以衍射光栅实验为例,调整教学环节,设计适应新时代新工科人才培养的物理实验教学体系,形成“基本原理→基础实验→仪器制造→仪器应用”模块化闭环教学理念导图如图1所示,探索物理实验教学中学生系统性思维、仪器制造思维的培养.

现行的大部分物理实验教学大纲,衍射光栅实验内容为:衍射光栅置于分光计上,正入射条件下测定光栅常数和汞灯谱线(紫光、2条黄光)的波长<sup>[3~5]</sup>.通过该实验,学生对光栅分光性能具有直观

的认识、对光栅衍射原理的理解更加深入,但对光栅在光谱仪中的应用知之尚浅,光谱仪的构造及应用未涉及,知识体系尚未完整,能力培养不完善.虽然部分学校或专业开设了光谱仪相关实验,但衍射光栅实验较为分散,教学效果不佳,人才培养质量尚可提升.换句话说,目前的衍射光栅实验对学生系统性思维、仪器制造思维的培养尚有欠缺,增加光谱仪及其应用的实验内容可解决上述问题.

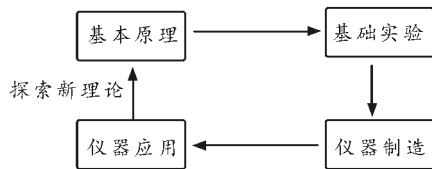


图1 闭环知识体系教学理念导图

## 1 实验教学内容与安排建议

衍射光栅实验模块化闭环教学体系包含两个方面的教学内容:其一,常规的衍射光栅实验,通过分光计测量衍射角计算汞灯波长(紫、绿、黄共4条谱线),这部分内容培养学生从原理到基础实验的思维能力;其二,光栅光谱仪测光源(显示屏、手机闪光

\* 华东理工大学2019年教学改革重点项目“互联网+过程考核的大学物理实验课程多元化评价体系研究”,项目编号:80222301901001

作者简介:吕昭月(1983-),女,博士,副教授,主要从事发光与信息显示的研究.

通讯作者:谢湘华(1971-),女,博士,副教授,主要从事平板显示技术的研究.

灯、发光二极管、汞灯等均可)的光谱,这部分内容培养学生从元件到仪器的制造思维和能力,若学时允许(如物理类相关专业),两个实验各安排2~3学时,如表1所示.

表1 衍射光栅实验模块化闭环教学内容

实验名称	学时	培养目标/教学要求
衍射光栅	2~3	原理到基础实验的思维能力
光栅光谱仪	2~3	元件到仪器的制造思维和能力

考虑很多高校或专业的物理实验学时有限,两个实验也可合二为一,衍射光栅实验中测3条谱线的波长是重复性能力要求,删减为测2条,剩余一刻钟左右的课时用于光栅光谱仪的教学,要求学生采集自己手机显示屏的光谱.集成化光栅光谱仪采集数据,高效快捷、操作简便,三两分钟即可完成一次光谱采集,智能化操作、学生出错率低,因此一刻钟即可完成教学任务.合二为一的教学形式,加“料”不加时,有限课时内完成更高层次的培养目标,增强学生课堂获得感.同时,鉴于光谱仪采集数据高效快捷,无需人均一套,课堂内学生们交替使用即可,20人的课堂2~3套足以.

针对合二为一的教学形式,光谱仪实验教学内容的设计如下:从光栅元件到光谱仪的思维启发、光谱仪的应用——解析手机显示屏色域.

## 2 从光栅元件到光谱仪的思维启发

光谱仪是采集待测样品对光源的吸收、反射、透射或发射荧光等光谱数据的仪器.对样品光谱数据进行分析可以定性或定量地获得样品的结构、成分、光学性能等信息,在环境、食品、医药、材料、生物、化学、物理等领域获得广泛应用<sup>[6~8]</sup>.

衍射光栅实验如何过渡到光谱仪?衍射光栅实验中,平行光管产生的平行光经光栅衍射后分光,保持光源和光栅不动,移动望远镜和人眼测量对应谱线的衍射角,可计算其波长,波长与衍射角一一对应.光谱仪所测光谱数据是光强随波长的变化情况,即测量不同波长处的光强,光强的数值测量通过光电探测器很容易实现.因此,制造光谱仪时需用光电探测器替换衍射光栅实验中的望远镜和人眼,依据

衍射光栅的原理,光源和光栅不动,转动探测器逐波长扫描,即可轻松实现光谱的测量.从光栅到光谱仪的设计和制造真如此简单?

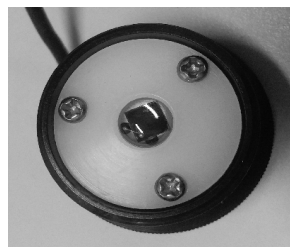
图2所示是光栅和简易光电探测器(探测面积2 mm×2 mm)的实物图,探测器比光栅笨重,仪器设计时转动探测器简单粗暴,不是好的设计方案,转动轻便灵活的光栅是更优的选择.注意,转动光栅后,光源不再正入射光栅平面,其光栅方程为

$$d(\sin \varphi_k \pm \sin \theta) = k\lambda \quad (1)$$

其中: $d$ 为光栅常数; $\varphi_k$ 是 $k$ 级衍射角; $\theta$ 为入射角,入射光与衍射光同侧时取“+”,异侧取“-”,正入射时 $\theta=0$ ;  $k$ 为衍射级次,光谱测量时常取一级衍射; $\lambda$ 是入射光波长.



(a) 衍射光栅



(b) 光电探测器

图2 衍射光栅和光电探测器实物

光栅衍射光经透镜汇聚后,在空间不同位置产生单一波长的光,光栅也称为单色仪.综合分析可知,光谱仪基本组成应包含:光源、单色仪、探测器、控制单色仪转动的驱动电路和计算机软件控制系统(如图3所示),这也是现行光栅光谱仪(如WGS-8光栅光谱仪、PE LS-55荧光光谱仪、Lambda 950紫外-可见-近红外分光光度计)的重要组成.

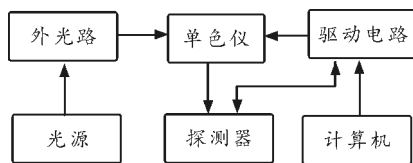


图3 光谱仪的基本组成

除了转动光栅,光谱仪的设计是否有别的方案?若光源、光栅、探测器均保持不动,如何测量光谱?前面提到,不同波长的光经光栅衍射后,通过透镜汇聚于空间不同位置,如果在相应空间位置均放置探测器也可实现光谱测量,形成阵列探测器光谱仪,简要结构如图4所示,Konica Minolta CS2000分光光度计核心组成正是如此.阵列探测器光谱仪无需逐波长扫描,数据采集效率更高.

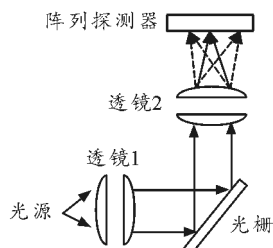


图4 阵列探测器光谱仪的基本组成

### 3 光谱仪的应用 —— 解析手机显示屏的色域

这部分要求学生用光谱仪采集自己手机显示屏白屏的光谱,通过 Origin 对光谱数据按峰位进行高斯分解,计算分解后不同峰对应光谱的色坐标,标于色坐标图中,并与 NTSC (National Television System Committee, 美国国家电视标准委员会) 和 sRGB (标准色彩空间) 对比<sup>[9]</sup>.

本文用 Konica Minolta CS2000 分光光度计采集不同手机的光谱,手机型号包括:iPhone 6S,7P,8P,X.图5是不同型号手机白屏的发光光谱,以绿色发光峰为基准进行了归一化处理(解析色域,只需考虑光的相对强度,也可不归一化).图中显示所有手机光谱在420~680 nm范围,覆盖可见光(380~780 nm)的大部分,主要发光峰位于 $618 \pm 15$  nm, $530 \pm 7$  nm, $452 \pm 5$  nm,分别对应红(Red, R)、绿(Green, G)、蓝(Blue, B)三基色,iPhone 6S和iPhone X显示屏的光谱有3个峰,对光谱数据进行高斯分解<sup>[10~12]</sup>,即假定手机显示屏是由不同强度、具有高斯型发光谱线的红、绿、蓝三色独立发光体线性叠加的结果,用高斯函数对光谱进行分离,如图6所示.分解获得3个独立发光体光谱,分别对应R (peak 3:Red),G (peak 2:Green),B (peak 1:Blue)三色.RGB三基色的合成光谱(图6中 fitted curve

所示)与实测光谱较好地吻合.

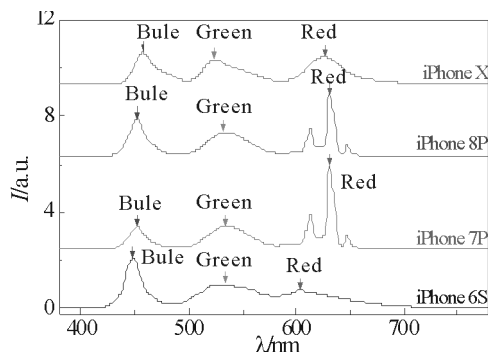


图5 不同型号手机显示屏的归一化光谱

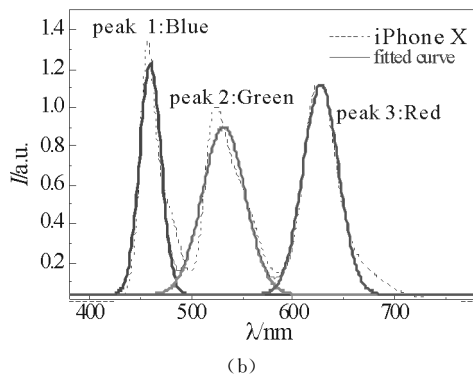
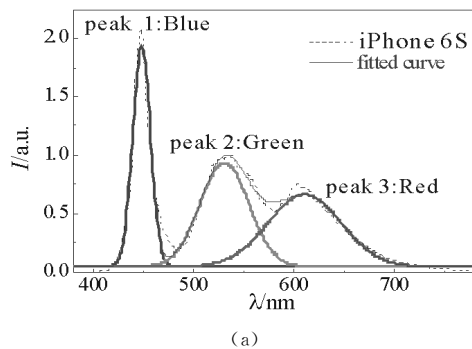


图6 手机白屏光谱的高斯分解

基于高斯分解的RGB三基色光谱计算出相应的色坐标,绘于图7中.RGB三基色坐标确定的三角形面积称为色域(color gamut),显示屏只能显示色域内的颜色.图7也绘制了NTSC和sRGB的标准色域,便于手机色域与之比较.从图7中可看出,目前手机显示屏普遍未达到NTSC标准,早期的手机(如iPhone 6S)显示屏与sRGB标准也有较大的差距,仅覆盖77.74%的sRGB,而iPhone X可以达到102.94%的sRGB,已实现广色域.iPhone 6S的色域远小于iPhone X,因此6S再现红色的能力极其有限,色彩视觉体验差.iPhone 6S用户浏览购物网站

时,红色和玫红色商品会出现较大的色差(注:iPhone 6S已使用时间比iPhone X长,未考虑显示屏色彩衰减).

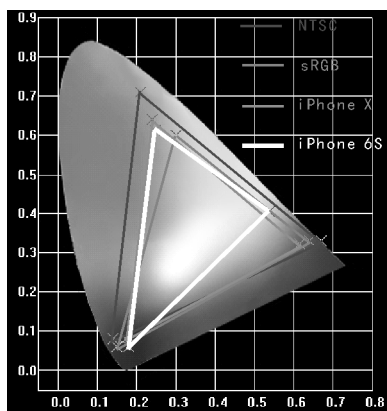


图7 iPhone 6S & X的色域与NTSC和sRGB标准对比

类似地,iPhone 7P,8P白屏光谱的高斯分解如图8所示,与iPhone 6S,X稍有不同,7P,8P的光谱有5个峰,在红光波段(600~700 nm)有3个峰,因此采用5峰高斯分解拟合.分解后的光谱叠加合成的光谱(图8中fitted curve所示)与实际测得的光谱较好地吻合.5个峰对应的光谱都可以计算出色坐标,但是这里为了与iPhone 6S和X比较,600~700 nm波段只选取峰强最大的光谱作为红色成分,与蓝色和绿色成分构成显示屏的三基色.

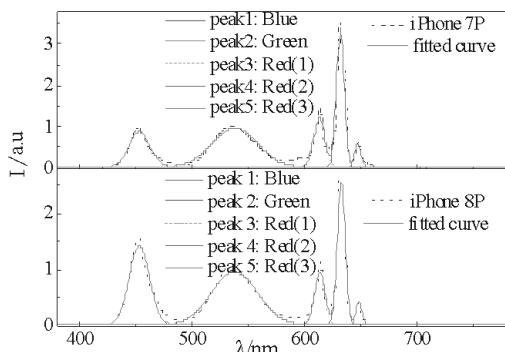


图8 iPhone 7P&8P白屏光谱的高斯分解

4款手机色坐标绘于图9,从图9明显看出,苹果手机从iPhone 6S到iPhone X,随着显示技术的进步和发展,色域逐渐扩大,具体色域值参见表2,相应的显示技术也列于表2中.

手机屏显示技术从液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)到有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED)<sup>[13~14]</sup>,色域实现了质的跃迁,已达到广色域水平,因为OLED采用有机发

光材料,其颜色范围广、容易化学修饰进行颜色调节<sup>[15]</sup>.iPhone X之前,苹果手机一直采用LCD,自iPhone X起(包括XS和XS Max),开始采用“轻、薄、柔”的OLED技术,前沿科技悄然融入课堂.

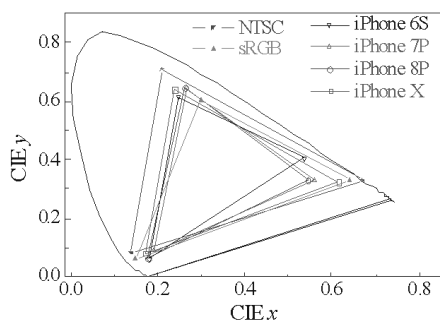


图9 不同型号苹果手机显示屏的色域

(注:iPhone 7P&8P红色色坐标来自600~700 nm波段最强峰)

表2 不同型号苹果手机显示屏的色域

色彩标准 / 手机型号	色域面积	sRGB的覆盖率 / %	屏幕显示技术
NTSC	0.158 2	/	/
sRGB	0.112 05	/	/
iPhone 6S	0.087104	77.74	LCD
iPhone 7P	0.093127	83.11	LCD
iPhone 8P	0.096 413	86.04	LCD
iPhone X	0.115 342	102.94	AMOLED <sup>a</sup>

<sup>a</sup> 主动式有机发光二极管显示(Active Matrix Organic Light Emitting Diode, AMOLED)

#### 4 结束语

本文以“基本原理→基础实验→仪器制造→仪器应用”模块化闭环知识体系为教学核心,衍射光栅实验结合光栅光谱仪,提升光栅教学的高阶性,培养学生从基本原理到仪器制造的思维.通过光谱仪采集手机显示屏光谱,与时俱进引入前沿科技,且富有趣味性和多样性,充分调动学生兴趣,寓学于乐中使仪器制造思维、显示技术的发展及其原理在学生心中扎根.这种闭环知识体系的教学理念可推及其他知识体系,尤其是工程类相关知识,对系统性、创新性、仪器制造等思维和能力培养大有裨益,助力新时代人才培养.

## 参考文献

- 1 张映辉. 适应新工科的大学物理、物理实验课程改革方向与路径初探[J]. 物理与工程, 2018, 28(5): 101 ~ 105
- 2 吴宝嘉. 新型理工科建设背景的物理实验教育教学平台创新实践改革[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(5): 182 ~ 186
- 3 刘丽飒, 朱江, 孙筹. 分光仪测衍射光栅常量的实验设计与数据处理[J]. 物理实验, 2011, 31(3): 38 ~ 40
- 4 吕佩伟, 马宋设, 马靖. 光栅衍射实验教学中的体会[J]. 物理与工程, 2014, 24(4): 43 ~ 46
- 5 朱江转, 罗锻斌. 衍射光栅实验中平行光正入射条件的讨论[J]. 大学物理实验, 2017, 30(3): 85 ~ 86
- 6 代双凤, 王楠, 张立福, 等. 光谱分析的葡萄酒掺水鉴别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2): 548 ~ 552
- 7 王金杰, 董朝青, 任吉存. 人体血清中原卟啉荧光相关光谱分析方法研究 [J]. 光散射学报, 2018, 30(4): 367 ~ 372
- 8 朱玲, 郑虹, 王中平, 等. 利用光栅单色仪测量罗丹明6G溶液吸收光谱[J]. 物理实验, 2018, 38(z1): 1 ~ 3
- 9 蒋春花. 浅析CIE 1931和CIE 1976中的sRGB、NTSC色域[J]. 电子质量, 2018, 2018(2): 54 ~ 56
- 10 徐登辉, 李熊, 王秀娥, 等. Rubrene薄层的位置对器件发光性能的影响及器件内激子复合区域的分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 340 ~ 343
- 11 Lü Zhaoyue, Hou Ying, Xiao Jing, et al. Effects of emissive layer architecture on recombination zone and Försterresonance energy transfer in organic light emitting diodes [J]. Displays, 2014, 35: 247 ~ 251
- 12 Lü Zhaoyue, Hou Ying, Xiao Jing, et al. Emission spectra dependence on voltage and emissive layer layout in organic light emitting diodes [J]. Vacuum, 2014, 109: 197 ~ 199
- 13 Chen Haiwei, Lee Jiunhaw, Lin Boyen, et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives [J]. Light: Science & Applications, 2018(7): 17168
- 14 Choi Yonghun, Ha Rhan, Cha Hojung. Fully automated OLED display power modeling for mobile devices[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2018(50): 41 ~ 55
- 15 Xiong Yan, Deng Fei, Xu Shan, et al. Performance analysis of multi-primary color display based on OLEDs/PLEDs[J]. Optics Communications, 2017(398): 49 ~ 55.

## Training Students' Thinking from Principle to Instrument in Physical Experiment

——Taking Diffraction Grating for an Example

Lyu Zhaoyue Li Mingda Xie Xianghua

(Department of Physics, School of Science, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

**Abstract:** Surrounding the teaching idea of modular and circular knowledge system from principle, grating diffraction experiment to spectrometer and its application, the teaching activity of diffraction grating experiment is adapted for new engineering talents, such as systematic thinking, thinking from principle to instrument. Thus, the progress from knowledge to ability is fulfilled and talent training quality can be improved. For the teaching procedure of spectrometer and its application, the spectra of phone displays were recorded by grating spectrometer and decomposed by Gaussian fitting, to elaborate color gamut and display principle of phone displays. Interesting, utility and profession are integrated in this experiment. The color gamut expansion of phone screens reflects the progress of display technology over time.

**Key words:** instrument manufacture thinking; systematic thinking; spectral analysis; flat display technology