

居家 DIY 光栅衍射系列实验

魏 波¹ 黄 丽¹ 辛 丽¹ 赵 华¹ 徐玲玲² 赵海发¹ 张 宇¹

(¹ 哈尔滨工业大学 物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

² 哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘 要 新型冠状病毒防控给大学物理实验教学带来了新的挑战和机遇。教师线上教学, 学生居家自主实验正成为这一特殊时期的实验教学的新特色。本文主要介绍“居家 DIY 光栅衍射系列实验”。以激光笔为光源, 利用常见的钢尺、丝网、光盘和液晶屏作为材料, 实现了一维/二维和透射/反射四种条件的光栅衍射。本系列实验通过生活中常见的简单器材, 可以观察到丰富的光栅衍射现象并进行精度较高的测量, 使学生在感受创造条件进行实验乐趣的同时加深对衍射的理解。因此光栅衍射系列实验非常适合作为居家和线下实验内容。

关键词 光栅衍射; 居家实验; 自主实验

A SERIES OF HOME DIY GRATING DIFFRACTION EXPERIMENTS

WEI Bo¹ HUANG Li¹ XIN Li¹ ZHAO Hua¹ XU Lingling² ZHAO Haifa¹ ZHANG Yu¹

(¹ School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001;

² School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract The novel coronavirus (COVID-19) control and prevention brings new challenges and opportunities to college physics experiment teaching. Online teaching by teachers and home-based experiments by students are the new characteristics of experimental teaching in this special period. This paper mainly introduces a series of home DIY grating diffraction experiments. Using a laser pen as the light source, and using a steel ruler, CD and LCD screen as the grating materials, the transmission and reflection grating diffraction in one-dimensional or two-dimensional can be realized. By using common and simple equipment commonly used in daily life, one can observe a wealth of grating diffraction phenomenon and do measurement with considerable accuracy, and accordingly, students can not only fully feel the fun of searching and collecting handy parts for non-lab experiments and but deepen the understanding of diffraction. Therefore, grating diffraction series experiments are very suitable for home and offline experiments.

Key words diffraction grating; non-lab experiments; independent experiment

收稿日期: 2020-04-24

基金项目: 教育部高教司“基础学科拔尖学生培养试验计划”研究课题(20180215), 黑龙江省高等教育教学改革研究项目(SJ-GY20210275, SJGY20200210)。

作者简介: 魏波, 副教授, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为固态离子学, bowei@hit.edu.cn。

引文格式: 魏波, 黄丽, 辛丽, 等. 居家 DIY 光栅衍射系列实验[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 131-135.

Cite this article: WEI B, HUANG L, XIN L, et al. A series of home DIY grating diffraction experiments[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 131-135. (in Chinese)

在新型冠状病毒防控的特殊时期,国内高校教师积极响应教育部“停课不停教,停课不停学”的要求,积极探索线上教学方式。考虑到实验课的特殊性,目前高校主要采用居家物理实验、虚拟仿真实验或二者相结合的混合在线教学的新模式^[1,2]。我校应用物理专业国家级实验教学示范中心教师积极行动,主要采用“居家 DIY 物理实验”方式进行本学期教学,推出了 20 余个实验项目。在教师指导下,学生真操实做,动手积极性高,辅导群内讨论热烈,已取得良好效果。本文主要介绍我校在“居家 DIY 光栅衍射实验”系列的尝试。

常见光栅是由大量等宽度和等间距的狭缝(反射面)平行排列而成的光学器件,在日常生活和科学研究中有广泛应用,例如光谱分析、光信息处理、全息和精密测量控制等^[3,4]。大学物理实验中与光栅有关的实验包括测量光栅常数、全息照相和 X 射线衍射等,需要用到精密光栅、分光计、光具座或光学平台等专业器材^[4,5]。生活中常见的光栅材料有钢尺、光盘、网筛、液晶屏幕、羽毛、立体画和各种晶体等,范围上包括了透射光栅和反射光栅,维度上涵盖了一维到三维。本系列实验以激光笔为光源和前四种材料为光栅,装置虽然简单,衍射现象和物理内涵却很丰富,因而非常适合作为居家 DIY 实验内容。

1 光栅衍射基本原理

光栅的实际结构多种多样,图 1(a)~(b)分别给出了简单情况的一维和二维光栅示意图,图 1(c)给出了透射和反射光栅发生衍射的实验光路图。一束平行光垂直入射光栅时,光栅衍射的明纹位置方程为

$$d \sin \theta_k = k\lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

其中, d 为光栅常数,是相邻两缝(刻槽)之间的间距,为透光(反射光)部分宽度 a 和不透光部分宽度 b 之和。 θ_k 为衍射角, k 为衍射级, λ 为激光波长。衍射角满足光栅方程时发生干涉加强现象。图中 x_k 为第 k 级亮纹或亮斑到第 0 级的距离, S 为光栅到墙面(屏)的距离,它们之间满足

$$\sin \theta_k = \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + S^2}} \quad (2)$$

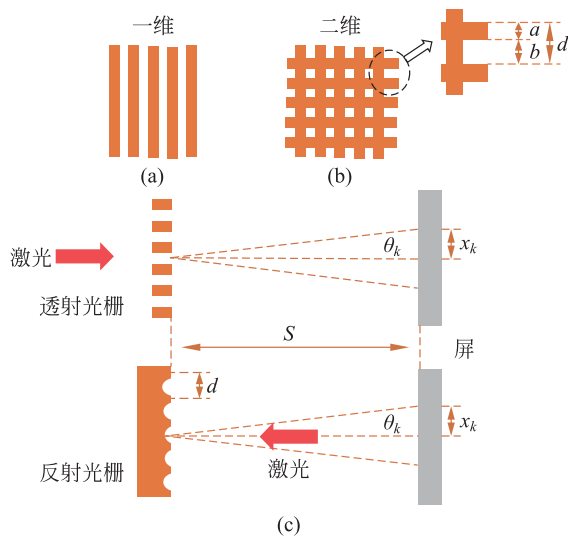


图 1 透射和反射光栅

(a), (b) 一维和二维透射光栅示意图; (c) 透射、反射光栅侧视示意图及实验光路图

在衍射角 θ_k 很小时,有

$$\sin \theta_k \approx \theta_k \approx \tan \theta_k = \frac{x_k}{S} \quad (3)$$

2 实验和讨论

2.1 自制一维透射和反射光栅衍射

由于受到居家条件限制,制作精密一维光栅有一定困难。使用细金属丝仔细排列可以制作出多缝或接近光栅的情况。也可以使用金属丝网为原料,将边缘部分金属丝小心去除。图 2(a)为使用 0.20mm 直径铜丝制作透射光栅(图 2(a)插图, $S=4.20\text{m}$)的衍射斑点,效果良好。图 2(b)为钢尺衍射装置图。所用钢尺的最小刻度为 0.5mm,相邻刻度之间为光滑的钢面,可以反射激光,而刻度线为黑色反射激光弱。激光笔的光斑直径约为 4mm,只能照射到有限数量刻度上。调整激光与钢尺接近平行时,激光光斑被拉长,圆形光斑可被拉长至数厘米,这样我们可以将钢尺看成一个反射光栅^[5]。将拉长的激光照射到钢尺表面,在白屏上可以观察到明显的衍射斑点和衍射环(见图 2(c))。由光栅衍射原理可知,当光程差 δ 为零或激光波长的整数倍时会出现亮斑

$$\delta = d(\cos \alpha - \cos \theta_k) = k\lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

实验中保持钢尺与白屏垂直。测量不同光斑到垂直桌面的长度 x_k ,白屏至激光照射位置 S ,以

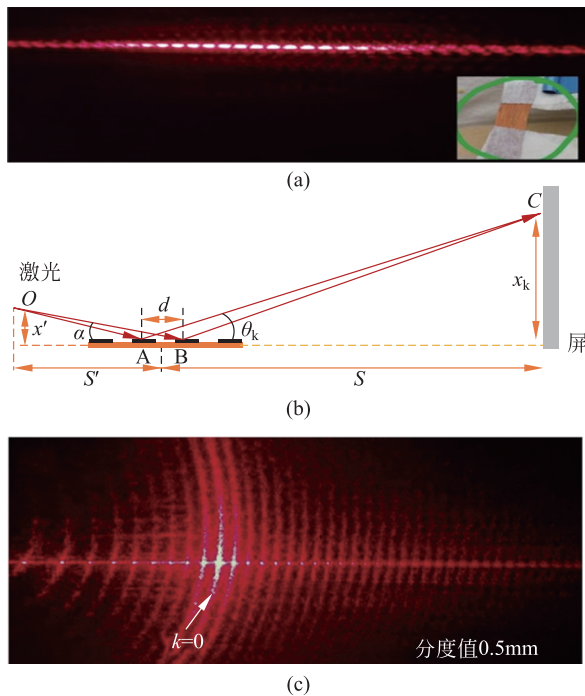


图2 透射和反射光栅衍射

(a) 自制透射光栅的衍射图案；(b) 钢尺衍射装置图；
(c) 钢尺衍射图案

及激光出口至桌面高度 x' 和与出光口到钢尺表面光斑中心的水平距离。根据式(4), 实验测得激光波长为 662.7nm , 与标称值 650nm 接近, 误差为 2.0% 。

2.2 光盘衍射

光盘是一种常见数据存储介质, 一般采用阿基米德螺旋线结构的渐进式记录轨道(见图 3(a)), 轨道上分布着记录二进制数据的凸起和凹槽。由于光盘上的轨道很密, 在激光笔光斑照射的很小区域可以视为一维反射光栅, 通过测量和利用式(2), 可以得到光盘光栅常数(轨道宽度)。

实验时光盘平行墙面, 激光垂直照射光盘表面, 可在墙上观察到衍射斑。调整反射光照到激光笔出口, 以保证入射角为 0 。CD 可以观察到 ± 1 和 ± 2 级衍射(见图 2(b)), 而 DVD 则可以看到 ± 1 衍射。改变光盘与墙距离或照射光盘不同位置, 测量 $3\sim 5$ 组数据, 并计算轨道宽度。实验中测得相邻两条轨道间距约为 $1.63\mu\text{m}$ 。为了让同学更直观地认识光盘的轨道结构, 我们采用扫描电子显微镜对 CD 和 DVD 的微观形貌进行观察, 所得图片分别在图 3(c)~(d) 中给出。从图中可以清晰观察到明暗相间的条纹, 根据二次电子成像衬

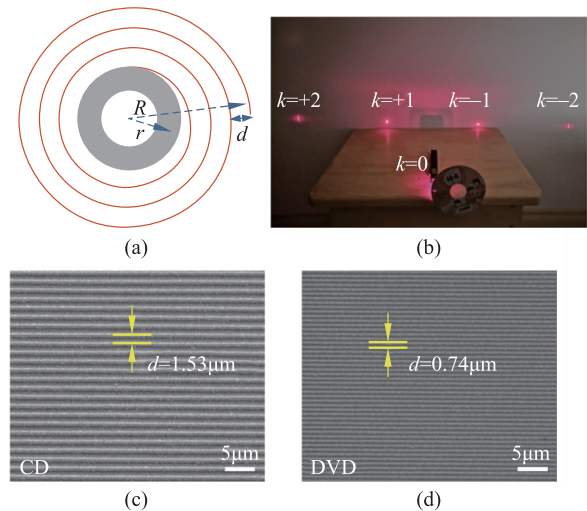


图3 光盘衍射及微观结构

(a) 光盘阿基米德螺旋线示意图；(b) CD 光盘衍射图；
(c), (d) CD 和 DVD 的扫描电子显微镜照片

度原理^[6], 明亮区域为轨道凸起。经测量得到轨道平均间距约为 $1.53\mu\text{m}$, 与通过衍射计算结果接近(误差 6.1%)。轨道宽度约为 $0.52\mu\text{m}$ 。从 DVD 显微图片可以看出, 其轨道间距更窄($0.74\mu\text{m}$), 这样可以存储更多信息。

进一步地, 可以估算光盘的容量。轨道间距 d 与环形区记录域宽度 $R-r$ 相比很小, 螺旋线的总长度 L 可用一系列同心圆周长之和来近似^[7,8]

$$L \approx 2\pi \frac{R+r}{2} \times \left(\frac{R-r}{d} + 1 \right) \quad (5)$$

轨道记录点的宽度 d' 通常为信道宽度 d 一半, 每个点数记录数据为 1 比特(1 字节 = 8 比特), 则光盘的总容量为

$$V = \frac{L}{d' \times 8 \times 1024 \times 1024} \quad (6)$$

本实验中估测 CD 光盘容量约为 685M, 标称容量为 700M, 误差为 2.1% 。

2.3 丝网衍射

平纹丝网(网筛)材质有不锈钢、铜、塑料和丝绸等, 多用于精确筛分、过滤或服饰等领域。常见丝网目数可以高达 500 目, 方孔孔径范围可以从毫米级到几十微米, 变化范围很大, 这为居家研究透射光栅衍射提供了很好的二维光栅或准光栅材料。图 4(a)给出是常见家用筛网。激光垂直入射平行于墙面的金属丝网, 可以在墙面上观察到清晰二维光栅衍射斑点(见图 4(b)), 零级主极强最明亮, 而且出现了 5 级缺级现象。进一步测量、计

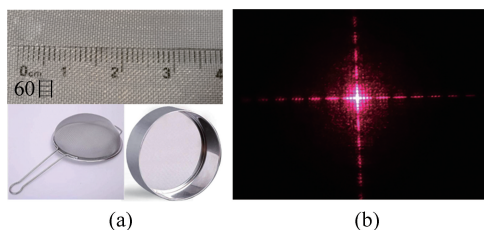


图4 网筛及其衍射

(a) 生活中常见的网筛; (b) 铜网的衍射图案

算可知丝网的光栅常数。此外,还可以区分网丝直径和方孔边长。由于家中一般没有游标卡尺或螺旋测微计可以使用。在此,基于夫琅禾费衍射理论和巴比涅互补原理,可以利用激光衍射法对细丝直径进行测量^[9]。通过对丝网边缘露出的细丝进行激光照射,可以得到直径 a ,并进一步计算得到孔径 b 值。根据丝网目数,查找标准值或出厂值并与计算值进行对比。本次实验测量的丝网光栅常数 d 为 0.441mm ,铜丝直径 a 为 0.090mm 。该实验也可以根据衍射结果推测未知丝网目数。通过不同材料对比实验发现,质地较硬的金属网衍射效果较好,而丝绸、纱布等材料质地软且有毛边,导致效果稍差。

2.4 液晶屏幕衍射

手机或平板电脑的液晶屏的像素点多由RGB子像素组成^[10],排列具有周期性,因此可以用作反射光栅并通过衍射实验测量其等效光栅常数。通过对比发现,四五年前旧款手机屏幕进行实验效果较好,便于光栅常数测量。最近几年,随着技术发展,液晶屏子像素排列已从传统RGB排列(见图5(a)),发展出RGBW排列(W为白色)、钻石排列和Delta排列等方式。这些复杂的排列方式可能会带来复杂衍射现象,给分析带来困难。因此,本实验建议采用旧款手机进行。

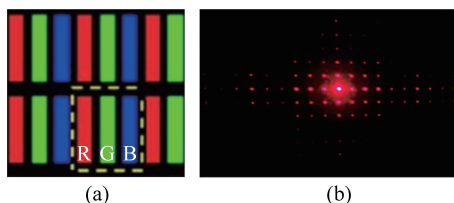


图5 液晶屏及其衍射

(a) 液晶屏像素RGB排列示意图; (b) 手机液晶屏衍射图

激光以接近垂直角度照射手机或平板屏幕,由于液晶屏是二维光栅,在墙面上可清晰看到两

组互相垂直的衍射斑点(图5(b),华为荣耀3X Pro),且斑点间距分布均匀分布。分别利用式(1)和式(3)计算水平和垂直方向的等效光栅常数。测量手机液晶屏的实际长度和宽度,查找手机分辨率(例如 1080×1920)计算两个方向的等效光栅常数,并与测量值对比。水平和竖直方向的实验值分别为 0.053mm 和 0.032mm ,说明竖直方向的分辨精度高于水平方向精度。实验结果与根据分辨率计算结果吻合较好(误差小于 2.5%)。实验中可以照射不同位置、改变光栅和屏距离 S 等条件进行多次测量,以提高实验精度。

对比以上四个实验可以发现,光盘的光栅常数最小,液晶屏次之,而丝网和钢尺则为亚毫米级,其缝隙或孔洞肉眼可见。本系列实验主要内容和问题思考汇总在表1中,后期可以进一步拓宽研究内容。受到居家条件局限,本系列实验以掌握物理思想为主,虽然不追求高精度测量,但结果仍令人满意。学生通过就地取材进行“居家DIY光栅衍射实验”,自主动手进行实验和探索,在获得了丰富的衍射图像的同时,又加深了对相关知识的理解。还可以鼓励学生仔细观察、寻找生活其他可以用来做光栅衍射的物品,进一步丰富本系列实验内容。

本系列实验注意事项主要包括:(1)实验时注意保护眼睛,务必不要直视且不要长时间进行观察。避免使用绿色激光笔,对眼睛刺激大,且可能会对液晶屏带来损坏。(2)避免实验功率较大的激光笔。(3)实验装置在测量时尽量保持稳定,避免晃动。(4)长度测量时建议使用直尺或卷尺,不要采用软尺,误差较大。

3 结语

本文基于光栅衍射理论,开发了系列“居家DIY光栅衍射实验”。充分利用非专业实验室的居家环境,以常见的钢尺、丝网、光盘和液晶屏作为光栅,实现了一维/二维和透射/反射条件四种光栅衍射。本系列实验内容简单却与日常生活生产密切相关,衍射现象明显且内容丰富,小成本,大产出,是很好的居家光学实验。通过实验,既有助于学生加深对光栅理论和应用的理解,又能激发动手实验的兴趣,使他们感受创造条件进行实验的乐趣,实现抗疫、教学两不误。该系列实验也

表1 居家DIY光栅衍射实验内容汇总

	维度,种类	基本实验	进阶内容	思考
自制光栅/ 钢尺	一维,透射/反射光栅	现象观察; 光栅常数测量; 激光波长测量	不同角度入射现象变化	钢尺衍射弧出现原因; 单缝、多缝衍射和一维光栅衍射的异同
光盘	一维,反射光栅	现象观察; 轨道宽度测量	光盘容量计算; 不同位置衍射现象	如何提高光盘容量; 白光照射产生什么现象; CD/DVD衍射现象区别及原因
丝网/薄纱	二维,透射光栅	现象观察; 光栅常数测量; 区分网线和孔宽度	对比不同目数; 网筛变形的影响; 倾斜照射光斑变化	观察网孔结构的影响; 一维/二维光栅衍射对比; 缺级产生条件和原因
液晶屏幕	二维,反射光栅	现象观察; 光栅常数测量; 对比两个方向精度	对比不同型号衍射斑点; 不同角度衍射现象; 显微镜观察像素排列	液晶屏不同排列方式对衍射的影响; 衍射图案与像素排列关联; 白光照射的现象及分析

可用于线下探究式课外实验项目,实现线上线下教学的有机结合。

参 考 文 献

- [1] 王青. 识变、应变:面向未来的在线大学物理教育—教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会关于推进在线物理教育教学研究的工作[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 3-6.
WANG Q. Opportunities and challenges: future oriented online college physics education—the work arrangement of the college physics course teaching steering committee of the ministry of education to promote the teaching research of online physics education [J]. Physics and Engineering, 2020, 30(2): 3-6. (in Chinese)
- [2] 张增明. 64学时大学物理实验线上教学方案及其设计思路[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 7-10.
ZHANG Z M. Syllabus of college physical experiments for online with 64 credit hours[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(2): 7-10. (in Chinese)
- [3] 赵伟, 张增明. 衍射光栅特性研究实验[J]. 物理实验 2017, 37(10): 22-25.
ZHAO W, ZHANG Z M. Experiment of characteristics of diffraction grating[J]. 2017, 37(10): 22-25. (in Chinese)
- [4] 赵海发, 辛丽, 方光宇, 等. 大学物理实验[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [5] 沈元华, 陆申龙. 基础物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [6] 周玉. 材料分析方法[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [7] 王文麒, 乐永康. 光盘结构及实验中的光学现象[J]. 物理实验, 2013, 33: 44-47.
WANG W Q, LE Y K. Structure of compact disk and optical phenomena in the experiment[J]. Physics Experimentation, 2013, 33: 44-47. (in Chinese)
- [8] 张楠, 李林, 史庆藩. 测量光盘物理参数的综合性实验设计[J]. 大学物理, 2011, 30(7): 44-46.
ZHANG N, LI L, SHI Q P. Experimental design of measuring physical parameters of CD[J]. College Physics, 2011, 30(7): 44-46. (in Chinese)
- [9] 韩力, 卢杰, 李莉. 动态激光衍射法测细丝直径[J]. 物理实验, 2006, 26(4): 1-2.
HAN L, LU J, LI L. Dynamic measurement of diameter by laser diffraction[J]. Physics Experimentation, 2006, 26(4): 1-2. (in Chinese)
- [10] 吕昭月, 李明达, 谢湘华. 衍射光栅实验的拓展—光栅光谱仪解析手机显示屏的护眼功能[J]. 物理与工程, 2019, 29(S1): 97-100.
LÜ Z Y, LI M D, XIE X H. Expansion of Grating diffraction—Analysis of eye protection of phone display by their spectra[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(S1): 97-100. (in Chinese)