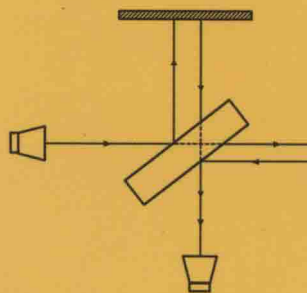
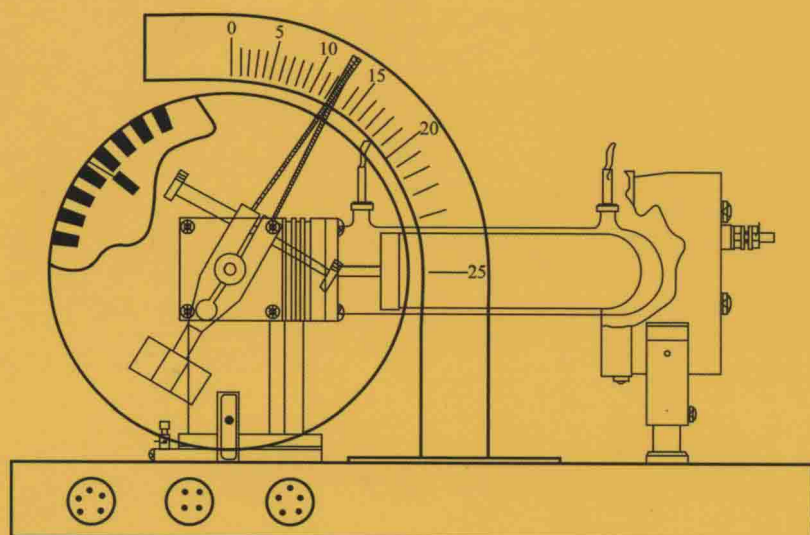


苗洪利 盖磊 王桂忠 编著



大学物理

综合设计实验



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

中国海洋大学教材建设基金资助

大学物理综合设计实验

苗洪利 盖 磊 王桂忠 编著

中国海洋大学出版社

• 青 岛 •

图书在版编目(CIP)数据

大学物理综合设计实验/苗洪利,盖磊,王桂忠编著. —青岛:中国海洋大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5670-1109-0

I. ①大… II. ①苗… ②盖… ③王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 063129 号

出版发行 中国海洋大学出版社

社 址 青岛市香港东路 23 号

邮政编码 266071

出 版 人 杨立敏

网 址 <http://www.ouc-press.com>

电子信箱 dengzhike@sohu.com

订购电话 0532-82032573

责任编辑 邓志科

电 话 0532-85902495

印 制 青岛国彩印刷有限公司

版 次 2016 年 3 月第 1 版

印 次 2016 年 3 月第 1 次印刷

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 8.25

字 数 160 千

定 价 28.00 元

大学物理实验是一门实践性很强的、独立于理论教学的课程。学生物理知识的掌握和实践能力的培养在很大程度上有赖于物理实验教学。在中国海洋大学“大学物理实验”精品课的建设中,建立了多层次实验教学体系,即由浅入深、循序渐进、不断提高能力的层次化教学。各层次教学有明确的能力培养要求。“大学物理综合设计实验”是一门面向高等院校部分理工类本科生的必修实验课,是层次教学体系中的第三层次,是继大学物理实验一、二的后续课,因此也称为大学物理实验三。该门实验课在内容上将力、热、光、电、原子物理等方面知识融为一体,强调物理学综合知识,在实验方法、实验步骤和数据处理上突出学生的自主性、设计性和创新性。

本教材针对“大学物理综合设计实验”课程编写,其内容贯穿了课程目标和指导思想。在每个实验项目编写中,除了常规的实验原理、实验内容和基本要求之外,增加了与本实验相关的背景知识,用以增强学生对实验的理解和兴趣。“思考题”可以加强和巩固对实验的认识和总结。以“附录”的形式补充了本实验所需要的理论知识、可供参考的实验手段和方法。在实验步骤和数据处理上不拘一格,有利于彰显学生实验报告的个性。逐步从传统千篇一律的实验报告向有创新的科学报告和科研论文转化。

为方便学习,在附表中较为全面地列出了物理实验中常用的物理单位及物理量表。另外,选择了三篇优秀学生实验报告并配有指导教师评语,供学习参考。

由于实验设备的不断更新,实验手段和方法的不断改进,教材的编写也需要不断改进和完善,加之编者水平有限,教材中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大师生批评指正。

在编写本教材的过程中,广泛参阅了兄弟院校的有关教材,汲取了其中富有启发性的观点和内容,在此表示衷心的感谢。

本教材的编写得到 2011 年中国海洋大学教材建设基金(201116)资助,同时获得中国海洋大学 2015 年教材出版补贴项目(2015CBJC08)资助,在此深表谢意!

编者

2016 年 3 月

实验一 光学多通道分析器的应用	1
实验二 微波的光学特性实验	18
实验三 微波布拉格衍射实验	30
实验四 燃料电池综合特性研究	35
实验五 太阳能电池综合特性研究	45
实验六 夫兰克-赫兹实验	49
实验七 液晶电光效应综合实验	66
实验八 空气热机实验	85
优秀实验论文之一 光学多通道线性定标选点对光谱测量精确度影响	98
优秀实验论文之二 太阳能电池最大输出功率随光照强度的变化	102
优秀实验论文之三 夫兰克-赫兹实验曲线波谷趋势异常分析	107
附表 1 我国法定计量单位和国际单位制	112
附表 2 物理常量表	115
附表 3 物理密度表	116
附表 4 海平面上不同纬度处的重力加速度	117
附表 5 固体的线[膨]胀系数	118
附表 6 在 20℃ 时某些金属的弹性模量	119
附表 7 在不同温度下与空气接触的水的表面张力系数	120
附表 8 粘滞系数	121
附表 9 固体导热系数	122
附表 10 某些固体和液体的比热容	123
附表 11 常用光源的谱线波长表	124
附表 12 不同温度下干燥空气中的声速	125
参考文献	126

实验一

光学多通道分析器的应用

实验目的

1. 了解光学多通道分析器的结构原理；
2. 学习光学多通道分析器的定标方法；
3. 掌握用光学多通道分析器测量未知光谱的方法。

背景知识

人们对光谱的研究已有一百多年的历史。1666 年,牛顿把通过玻璃棱镜的太阳光分解成了从红光到紫光的各种颜色的光谱,他发现白光是由各种颜色的光组成的。这可算是最早对光谱的研究。

其后一直到 1802 年,渥拉斯顿观察到了光谱线,在 1814 年夫琅和费也独立地发现了光谱。牛顿之所以没有观察到光谱线,是因为他使太阳光通过了圆孔而不是狭缝。在 1814~1815 年之间,夫琅和费公布了太阳光谱中的许多条暗线,并以字母来命名,其中有些命名沿用至今。



牛顿

(Newton, 1642~1726)

英国物理学家、数学家



渥拉斯顿

(Wollaston, 1766~1828)

英国物理学家



夫琅和费

(Fraunhofer, 1787~1826)

德国物理学家

实验原理

光谱仪器的核心是分光系统,主要采用棱镜分光、光栅分光、F-P 干涉仪分光以及傅里叶变换分光等。本实验所用光学多通道分析器采用光栅(反射光栅)分光。

光栅可以使入射光的振幅或相位(或两者同时)受到周期性的空间调制。在现代光谱仪器中,光栅被大量使用,尤其是闪耀光栅。随着现代光栅制造工艺的进步,光栅能运用于很宽的光谱范围,逐渐取代过去常用的分光元件——棱镜。

1. 光栅分光原理

光栅方程式:

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

式中, d 为光栅常数, φ 为入射角, θ 为衍射角, λ 为单色光波长, k 为主最大的级数。在满足式(1-1)的 θ 方向上应有与主最大对应的亮条纹出现,因此,光栅方程式为决定主最大方向的公式。公式中(+)号用于衍射光和入射光在法线的同侧(图 1-1);(-)号用于衍射光和入射光在法线的异侧。

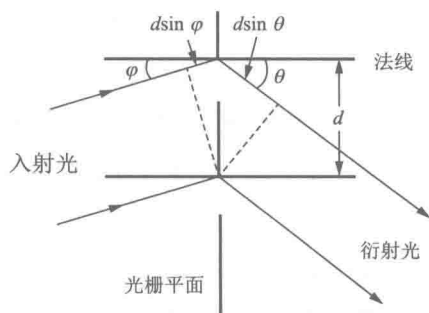


图 1-1 透射光栅示意图

光栅光谱的产生是多缝干涉和单缝衍射联合作用的结果,多缝干涉决定光谱出现的位置,单缝衍射决定谱线的强度分布,如图 1-2 所示。对于图 1-1 所示的透射光栅, $k = 0$ 对应的主最大位置必然是衍射线与入射线在法线的异侧,且 $\theta = \varphi$ 。 $k = 0$ 时无色散,除此之外的各级均有色散,即除 $k = 0$ 以外,同一入射角的不同波长光均有不同的衍射角,并且按波长的次序自第零级开始向左右两侧,由短波向长波散开,如图 1-3 所示。

对于棱镜光谱,只有按波长次序的一个单一的排列,而没有级可分,或者说棱镜光谱是零级光谱;而在光栅光谱中却没有零级光谱。这是两种分光器件光谱的显著不同之处。不同波长的光在光栅光谱中的位置,在 θ 角不是很大的情况下,正比于波长,即在光栅光谱中,波长长一倍的光谱离第零级主最大的距离约远一倍,故光栅光谱又称正比光谱,而棱镜光谱则为非正比光谱。

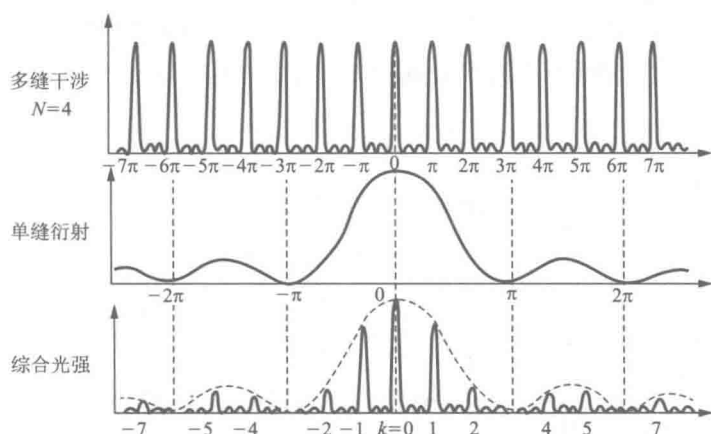


图 1-2 多狭缝光栅光强分布曲线

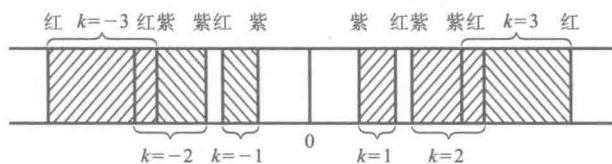


图 1-3 光栅光谱示意图

对于一般的透射光栅,它的衍射光强分布总是由一个占光能量很大部分且没有色散的零级主最大和在两侧对称分布的若干各级主最大组成,而有色散且分辨能力高的较高级主最大的光强反而很小(图 1-2)。没有色散的零级占了大部分能量,这十分不利于光栅的应用。在 1888 年,罗兰指出过,利用刻槽有一定形状的反射光栅,可将衍射光集中在某一级光谱上,即通过控制刻痕的形状可改变各级主最大的相对光强分布。1910 年,伍德(R. W. Wood)改进了钻石刀头的形状做出了第一个用于红外光的光栅,后称为闪耀光栅(blazed grating),这种光栅亦称定向光栅。现代光谱仪几乎全部采用闪耀光栅,其刻痕形状如图 1-4 所示。

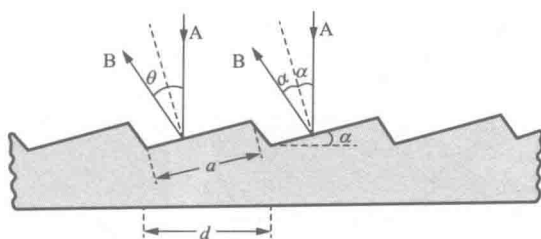


图 1-4 闪耀光栅

在这种光栅所生成的衍射图样中,各级主最大的位置不受刻痕形状的影响,仍由光栅方程式(1-1)确定,而单缝衍射的中央最大(即包络线的中心)却从原来与零级主最大重合的方向位置移至由刻痕形状决定的反射光的方向,结果在反射光方向的光谱(主最大)变强或称闪耀。例如,在图 1-4 中,刻槽面与光栅平面成 α 角(称闪耀角),垂直于光栅平面

($\varphi=0$)的入射光 A 在槽面上的入射角为 α , 于是, 在与槽面法线成 α 角的反射光 B 的方向上(衍射角 $\theta=2\alpha$)的主最大得到最大的相对光强度。

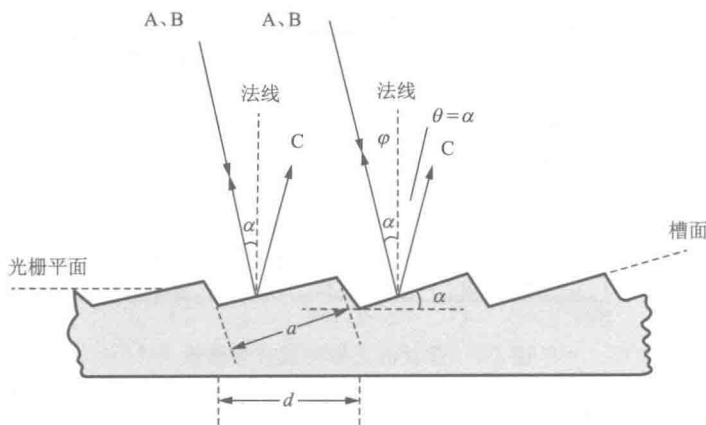


图 1-5 确定闪耀波长原理图

闪耀波长 λ_B 的确定:

令入射光 A 垂直于刻槽面, 即入射光对光栅平面的入射角 φ 等于槽面与光栅平面的夹角 α , 同时在与光栅平面法线成 α 角的方向 B 观察($\theta=\alpha$), 此时, B 方向即为单缝衍射的中央最大方向(包络线中心), 能量最大。依据光栅方程(1-1), 多缝干涉的零级主最大($k=0$)位置不受槽面形状影响, 应该在 C 方向($\theta=\varphi$), 由于入射线与衍射线在法线异侧, 方程中取(-)号, 故方程成立。至此, 单缝衍射中央最大(B 方向)与干涉零级主最大(C 方向)分离成 2α 角度, 与图 1-4 有一致的结论。在单缝衍射中央最大的 B 方向上被闪耀的光谱波长 λ_B 称为闪耀波长, 可由光栅方程式求出:

$$d(\sin \alpha + \sin \alpha) = k\lambda_B \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots$$

即

$$2d\sin \alpha = k\lambda_B \quad (1-2)$$

例如, 每毫米 600 刻痕的闪耀光栅, 当闪耀角为 9.5° 时, 它的一级闪耀波长 $\lambda_B = 546.1 \text{ nm}$ 。

2. 光栅的基本特性

(1) 色散本领。

对于式(1-1)的光栅方程, 取 $\varphi=0$ 后, 两边微分即得角色散。

角色散:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos \theta} \quad (1-3)$$

光栅的角色散率与光谱级次 k 成正比, 级次愈高, 角色散愈大; 与光栅刻痕密度 $1/d$ 成正比, 即刻痕密度愈大(光栅常数 d 愈小), 角色散愈大。

线色散：

光栅的线色散是指在聚焦物镜的焦平面上，波长相差一个单位的两条谱线间分开的距离。

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{d\theta}{d\lambda} = f \frac{k}{d \cos \theta} \quad (1-4)$$

为了使不同波长的光分得开一些，一般都采用长焦距物镜， f 是焦距。由于实用光栅的光栅常数 d 通常都很小，所以光栅的色散本领都很大。

(2) 分辨本领。

分辨本领表征光谱仪分辨开两条波长相差很小的谱线的能力。

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN \quad (1-5)$$

该式说明，光栅分辨本领与光栅常数无关，只与光谱级次 k 和光栅刻痕数 N 有关。

仪器介绍

WGD-6 型光学多道分析器由光栅单色仪、CCD 接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D 采集单元及计算机组成。该仪器集光学、精密机械、电子学、计算机技术于一体，是当代光学测量仪器的典型代表。

1. 仪器结构

该仪器由光学暗箱、电源控制箱及计算机系统组成，如图 1-6 所示，光学暗箱结构如图 1-7 所示。

入射狭缝为直狭缝，宽度为 $0 \sim 2 \text{ mm}$ 连续可调。光源发出的光束进入狭缝 S_1 ， S_1 通过 M_1 反射镜位于反射式准光镜 M_2 的焦面上，通过 S_1 射入的光束经 M_2 反射成平行光束投到闪耀光栅 G 上，衍射后的平行光束经物镜 M_3 成像在 S_2 上。

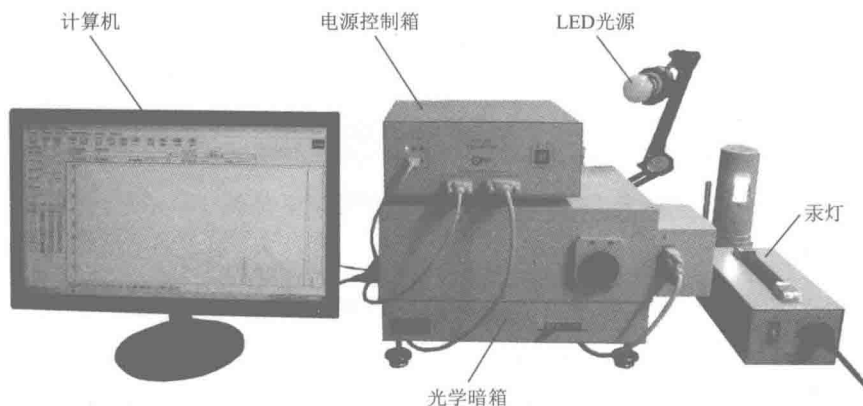


图 1-6 实验仪器连接图

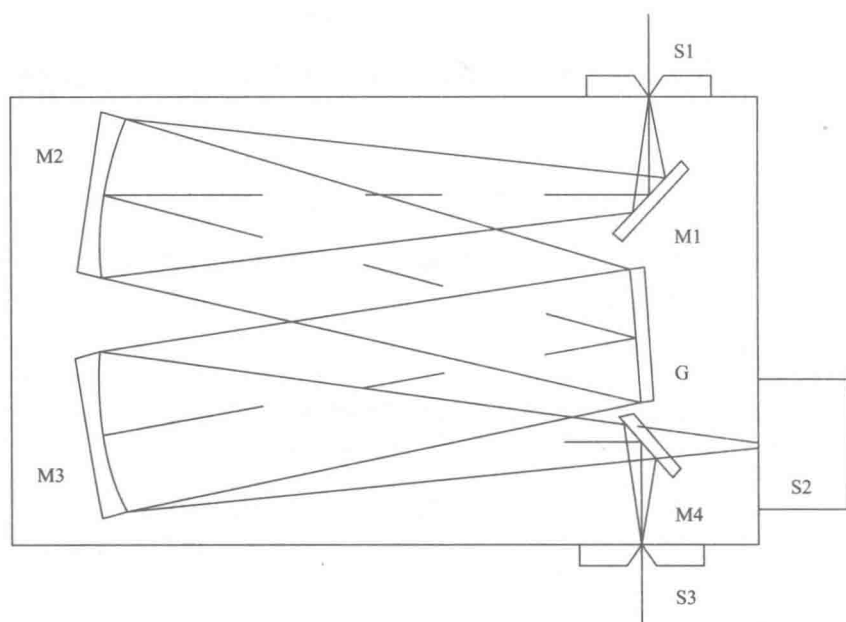


图 1-7 光学暗箱结构图

M1—反射镜;M2—准光镜;M3—物镜;M4—转镜;G—闪耀光栅;

S1—入射狭缝;S2—CCD 接收位置;S3—观察窗(或出射狭缝)

2. 性能指标

测量波长范围	300~900 nm
M2/M3 焦距	302.5 mm
分辨率	优于 0.2 nm
波长重复性	≤ 0.1 nm
光栅 G	600 条/毫米, 闪耀波长 550 nm
CCD	接收单元: 2 048。积分时间: 1~88 挡

操作步骤

(1) 打开汞灯。

汞灯作为测量中的定标光源,要反复使用。使用前要预热 10 min。打开后一直到实验结束不要关闭。

注意:由于汞灯中含对人眼有害的紫外光,在实验中不要长时间注视灯光。

(2) 打开计算机。

(3) 打开电源控制箱开关。

(4) 开启仪器测量软件。

在计算机桌面双击“WGD-6 型组合式多功能光栅光谱仪(CCD)”,进入软件系统。

进入工作界面前,首先弹出一个对话框如图 1-8 所示,让用户选择初始波长位置是否有效,如果选择“是”则确认当前的波长初始位置,否则初始化,初始波长位置回到 300 nm 处。

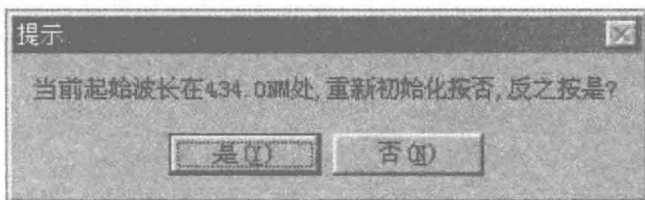


图 1-8 “提示”对话框

工作界面见图 1-9,主要由菜单栏、主工具栏、辅工具栏、光栅旋转及测量数据显示区、光谱显示区、状态栏、参数设置区以及存储器信息提示区等组成。(建议使用下拉菜单或主工具栏,不使用辅助工具栏)

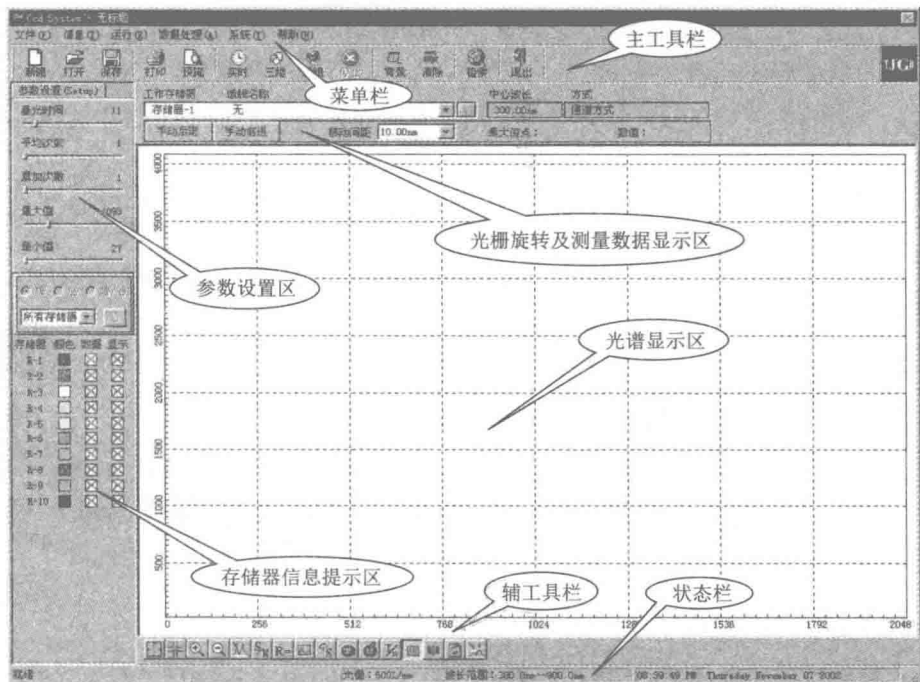


图 1-9 工作界面

(5) 用汞灯校准中心波长。

打开菜单栏—信息—显示中心波长,接收汞灯入射光。打开菜单—运行—实时采集,或主工具栏中“实时”按钮。调整入射光狭缝或汞灯入射光方位,使光谱区显示的汞灯谱线呈峰部细尖状。用“手动前进”或“手动后退”将某一条已知波长的汞灯谱线调至中心波长虚线位置,如果“中心波长”指示值与汞灯光谱值一致,无需校准,否则,停止采集,打开主菜单—系统—修改波长。填入适当值进行波长校准,再进入实时采集状态,直至中心波

长指示值与汞灯光谱值一致,校准完成。

(6) 定标。

由于本仪器是教学型光谱测量仪,光谱显示窗的初始横坐标为通道数(0~2 048),测未知光谱之前,必须使用标准汞灯进行定标,使得光谱显示窗的横坐标为波长值。定标分为手动定标和自动定标两种。在进行准确中心波长校准之后,可采用自动定标,但可能会存在较大误差,一般还是采用手动定标较为精确。汞灯的标准谱线波长如表 1-1 所示,本实验可见到的汞灯谱线如图 1-10 所示。

表 1-1 汞灯的标准波长(nm)

690.716	623.437	612.327	607.264	579.065	576.959	546.074
491.604	435.835	434.750	433.924	407.781	404.656	365.151

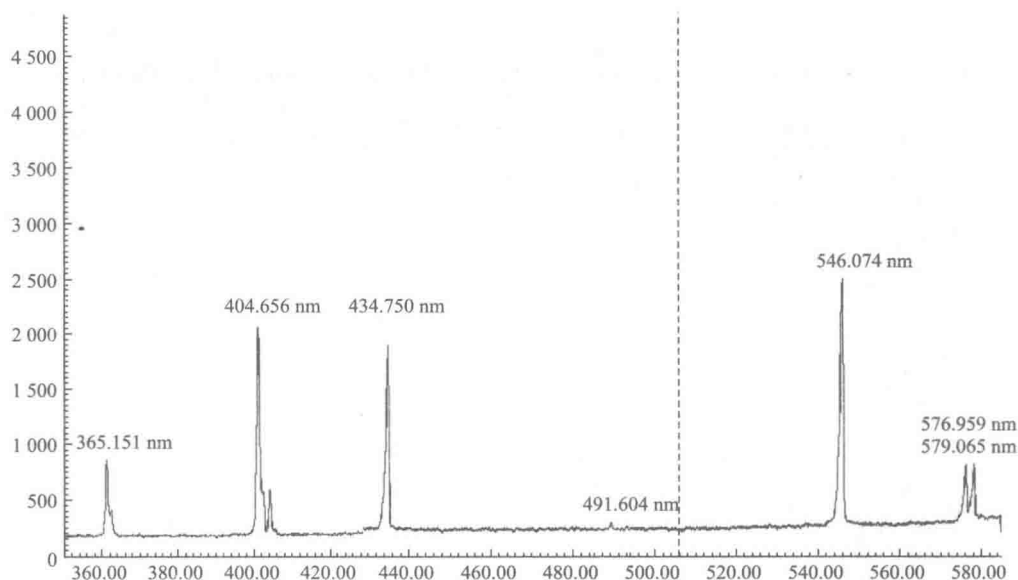


图 1-10 常用汞灯定标谱线

手动定标的步骤如下:

① 实时采集汞灯谱线,调整谱线呈峰部细尖状,并用“手动前进”或“手动后退”选择要定标的窗口范围,使定标窗口至少出现两条已知汞灯谱线,(在精确校准中心波长后可在出现一条已知汞灯谱线情况下进行线性定标,另一已知值采用中心波长值)。

② 停止实时采集,打开主菜单“数据处理”—“手动定标”;

③ 用鼠标点到要定标的峰尖处,精确移动可以使用键盘的“←”、“→”移动键,精确定位后按键盘“ENTER”回车键,出现如图 1-11 所示的提示窗口。

在波长编辑框中输入该标准谱的波长。如果选择下一个点,点击“添加 || 下一点”按钮,添加其他的标准谱(至少选择两个点才能定标)。

④ 开始定标,选择“添加 || 定标”按钮,系统将弹出如图 1-12 所示的最小二乘法定标窗口。如果选择两个点,只能选择线性定标;如果选择 3 个以上的点,可选择二次以上定标。在此窗口可以看到定标公式,最后按下“定标”,即完成定标。



图 1-11 手动定标提示窗

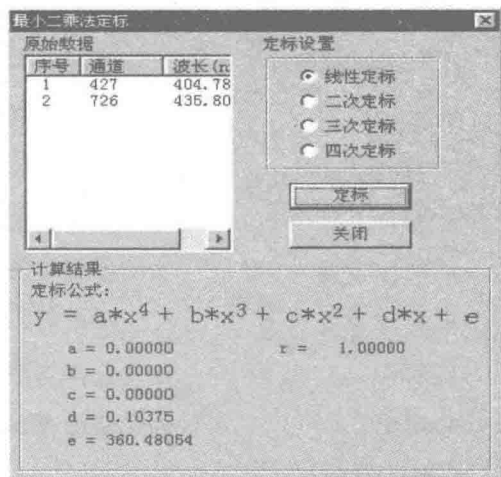


图 1-12 最小二乘法定标窗口

(7) 测量。

通过定标后光谱显示窗的横坐标从通道数改为波长数,移开汞灯,置入未知光源可进行光谱测量。在测量过程中,不可使用“手动前进”或“手动后退”。如果要测量其他窗口内的光谱,需要再用汞灯,找到所需谱线重新定标。

实验内容

1. 熟练掌握手动定标的步骤和方法,对同一窗口采用不同的采集点进行不同线性定标和非线性定标,比较精确度。
2. 自拟方案,测量白炽灯、节能灯、各色 LED 光源的光谱并进行分析比对。

思考题

1. 为什么称为光学多通道分析器?多通道指的是什么?
2. 光谱的分布与通道数呈线性关系吗?线性定标与非线性定标哪个更精确?
3. 当显示窗口中只有一条汞灯标准谱线时,能否进行定标?

附录 1 软件介绍

菜单栏中有“文件”、“信息”、“运行”、“数据处理”、“系统”等菜单项。

1. “文件”菜单

- | | |
|--------|--------------------|
| • 新建 | 清除当前实验的所有数据,新建一个文件 |
| • 打开 | 打开一个已经存在的数据文件 |
| • 保存 | 保存所选择存储器中的数据 |
| • 打印设置 | 设置打印机的属性及打印参数 |
| • 打印预览 | 显示打印时文件的外观 |
| • 打印 | 打印当前的谱线及数据 |
| • 退出 | 退出 WGD-6 控制处理系统 |

2. “信息”菜单

- | | |
|------------|--------------|
| • 信息输入 | 输入采集环境及其他信息 |
| • 网格 | 显示网格坐标 |
| • 显示中心波长位置 | 在坐标系统上显示中心位置 |

3. “运行”菜单

- | | |
|----------|-----------------|
| • 实时采集 | 在当前位置循环采集数据并显示 |
| • 三维显示 | 采集当前的谱线在三维坐标中显示 |
| • 模拟照相 | 模拟摄谱仪,显示底片效果 |
| • 停止 | 停止实时采集 |
| • 手动前进 | 波长向长波方向移动指定的间隔 |
| • 手动后退 | 波长向短波方向移动指定的间隔 |
| • 背景记忆 | 记录当前的暗环境,在采集时扣除 |
| • 清除背景记忆 | 清除记录的背景 |
| • 检索 | 把中心处的波长移动到指定波长 |
| • 重新初始化 | 对波长重新定位,参数重新设置 |

4. “数据处理”菜单

- | | |
|-----------|--------------|
| • 读取谱线数据 | 读取指定谱线上各点的数据 |
| • 读取坐标点数据 | 读取坐标面上各位置的坐标 |
| • 扩展 | 对谱线进行局部放大 |
| • 取消所有扩展 | 取消本次实验的所有扩展 |

- 手动定标 使用标准谱标定波长
- 自动定标 使用定标公式进行定标
- 通道/波长转换 通道/波长显示方式变换
- 寻峰 检索峰、谷的位置
- 显示峰谷 在谱线上标记峰谷的标志
- 显示峰谷数据 显示谱线上峰谷对应信息
- 显示方式 选择显示峰谷信息的方式
- 平滑 平滑选定的谱线
- 计算 对设置的谱线进行计算
- 显示 根据设置显示谱线
- 清除数据 清除选定的数据
- 刷新 刷新屏幕

5. “系统”菜单

- 波长修正 修正波长
- 光栅 选择相应光栅参数

附录2 三棱镜分光

1. 基本原理

白光经过介质后,展开为单色光的现象称为色散(也称为分光)。介质对光的折射率与波长有关,且关系较为复杂。从实验获得的折射率 n 与波长 λ 的色散曲线如图 F1-1 所示。

从图中可以看出,波长增加时折射率在减小,曲线的斜率(也称色散率)也在减小,这样的色散称正常色散。各种介质的色散曲线的形状都不一样。所以各种材料做成的棱镜,得到的光谱所对应的谱线间隔不会完全一致,这一点有别于光栅分光。

假如一束光包含 λ_1, λ_2 且 $\lambda_1 < \lambda_2$, 以 i 为入射角射入如图 F1-2 所示的三棱镜,经第一次折射后。根据折射定律 $n = \sin i / \sin r$, 由于折射率的不同, $r_1 < r_2$ 经过另一面的二次折射,使出射光分开。这就是棱镜分光的基本原理。

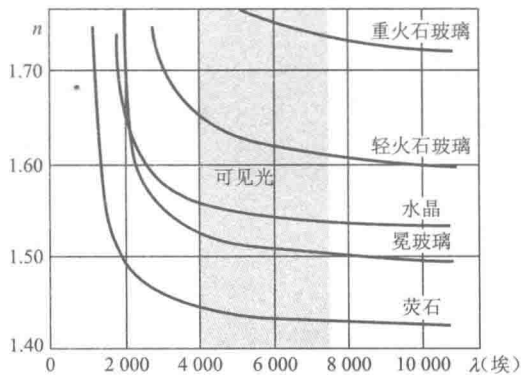


图 F1-1 几种介质的色散曲线

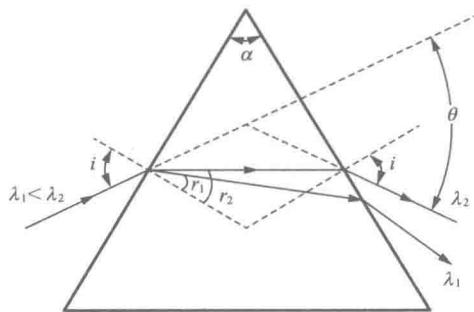


图 F1-2 三棱镜分光示意图

棱镜光谱仪在工作时总是使棱镜工作在最小偏向角或接近于最小偏向角的条件下。通常选择光谱范围中间波长满足最小偏向角条件,这是因为达到最小偏向角时通过棱镜的光路完全对称,棱镜内部光线几乎平行于棱镜底边。光路对称,一方面便于设计,同时棱镜产生的像差(球差、像散等)最小,棱镜不产生附加的横向放大率。

2. 棱镜的基本特性

(1) 棱镜的色散率。

色散率反映分光系统将不同波长的光在空间散开的能力,通常表示为角色散和线色散。

当棱镜位于最小偏向角时,棱镜的角色散率表达式如下: