

光栅光谱仪基本原理与应用

光谱是将包含多种波长的复合光按照波长(或频率)为横轴、光强为纵轴进行分解排列,形成光谱图,从而分析光束的组成成分。光谱仪是用于光谱检测的仪器,可以详细分析光源的光谱分布及其成分。

当光作用于物质时,会产生透射、散射、吸收和发射等现象,形成不同类型的光谱。光谱检测技术是研究光与物质相互作用的重要手段之一,是现代科学研究物质微观结构的核心方法。其优势在于具有高灵敏度和无损检测的特点。通过检测光源的光谱分布,光谱仪不仅能够揭示光源的基本特性,还能通过光谱分析获取物质的相关信息,如元素种类、组分、内部能级结构、化学键性质和反应动力学等。因此,光谱检测技术广泛应用于生物医学、环境监测、卫生检疫、食品制药、金属工业和科学研究等领域。

光谱仪根据采用的色散元件不同,通常可分为棱镜光谱仪和光栅光谱仪。棱镜光谱仪利用棱镜的色散效应分离光谱,具有结构简单、制造容易的优点。然而,光栅光谱仪因其波长覆盖范围广、分辨率高等优势,逐渐取代了棱镜光谱仪。随着光栅技术的不断进步,特别是高精密光栅的制造成本逐渐降低,光栅光谱仪成为最常用的光谱仪器,广泛应用于吸收光谱仪、荧光光谱仪和拉曼光谱仪等领域。

光栅光谱仪利用光栅的衍射效应将复合光分解为其组成的单色光谱。光栅由一系列等间距的刻线组成。当光束照射到光栅上时,由于衍射和干涉作用,不同波长的光在不同的角度被分离,从而形成光谱。光栅光谱仪的分辨率取决于光栅的刻线密度和入射光的波长。通过选择不同的光栅和调整入射角度,可以实现不同波段光谱的分析。

通过本次实训,学生不仅能够设计与搭建光栅光谱仪,还可以深入了解其工作原理、设计结构和各部件对实验系统的影响或作用。这不仅有助于掌握光栅光谱仪的基本操作和应用,还能培养学生的实践能力和创新思维。

【实训目的】

- (1) 了解光栅光谱仪的原理。
- (2) 搭建光谱色散光路。
- (3) 观察白光的衍射效果。
- (4) 测量不同光源的光谱、主波长、色度和色纯度等参数。
- (5) 测量 LED 的发光角度。
- (6) 测量样品的透过率、反射率和吸收度。
- (7) 测量样品的浓度。

【理论基础】

1. 光栅简介

光栅光谱仪通常由一个入射狭缝、一个色散系统、一个成像系统、一个或多个出射狭缝和采集系统组成。图 3-1 所示为同轴光谱色散套件的光路示意图。

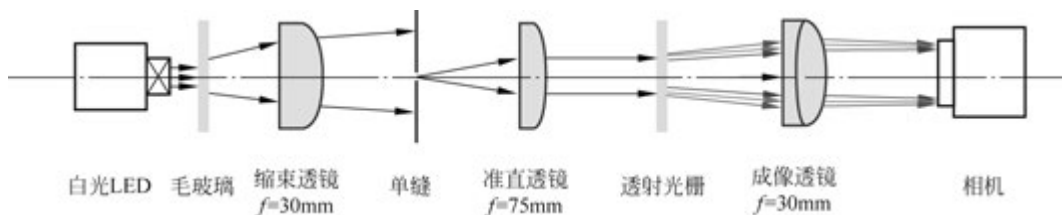


图 3-1 同轴光谱色散套件的光路

光栅是色散系统中的关键组件。通常来说,任何具有空间周期性的衍射光学元件都可以称为光栅。光谱仪中的光栅是通过在光学板上刻划许多与光波长相当的等距平行刻槽制成的,通常每毫米有数百至数千条刻线。光栅可分为透射式和反射式两种类型。

(1) 透射式光栅:在镀铝的光学玻璃上刻划出一系列等宽、等距、平行的狭缝。

(2) 反射式光栅:在镀铝的光学玻璃上刻划出一系列等距、平行的刻线,这些刻线具有锯齿形的剖面结构。常见的反射式光栅包括正弦形全息记录反射光栅、三角形全息记录离子蚀刻反射光栅和平板型全息记录离子蚀刻反射光栅。

本实训采用透射式光栅。

2. 采集系统

采集系统主要由探测器、数据采集卡和计算机系统组成,探测器是关键元件。目前用于光谱仪上的探测器主要有光电倍增管(photo multiplier tube, PMT)、电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)和互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)。

1) PMT——光电倍增管

光电倍增管是光子技术领域中的重要器件,具有极高的灵敏度和超快的时间响应。它广泛应用于光子计数、极微弱光探测、化学发光、生物发光研究、低能量射线探测、分光光度计、旋光仪、色度计、照度计、尘埃计、浊度计、光密度计、热释光量仪、辐射量热计、扫描电镜、生化分析仪等仪器设备中。

PMT 是一种真空器件,由光电发射阴极(光阴极)、聚焦电极、电子倍增极及电子收集极(阳极)等组成。当光照射到光阴极时,光阴极向真空激发出光电子。这些光电子通过聚焦电极电场进入倍增系统,并通过进一步的二次发射得到倍增放大,最终放大的电子被阳极收集作为信号输出。由于采用了二次发射倍增系统,PMT 在探测紫外-可见-近红外区的辐射能量时,具有极高的灵敏度和极低的噪声。此外,PMT 还具有响应快速、成本较低、阴极面积大的优点。

然而,PMT 也有其局限性。它对光子的波长或频率没有区分能力,因此被称为“色盲”。在探测时,通常通过调控狭缝控制进光量,但这也会影响探测的光谱分辨率。为了探测整个光谱,必须采用旋转光栅扫描的方式,这使光谱检测时间较长。



2) CCD——电荷耦合器件

电荷耦合器件是一种大规模集成电路光电器件,是在金属氧化物半导体集成电路技术基础上发展起来的新型半导体传感器。它能够将光学影像转化为数字信号。CCD上植入的微小光敏物质称作像素(pixel)。CCD包含的像素数越多,其提供的画面分辨率也就越高。CCD的作用类似于传统胶片,但它是通过将光信号转换为电荷信号实现图像记录的。

CCD上排列整齐的光电二极管能感应光线,并将光信号转变为电信号,经过外部采样放大及模数转换电路转换成数字图像信号。CCD的突出特点是以电荷作为信号载体,这与大多数器件以电流或电压作为信号载体的方式不同。因此,CCD的基本功能是电荷的存储和转移。它存储由光或电激励产生的信号电荷,当施加特定时序的脉冲时,其存储的信号电荷便能在CCD内作定向传输。CCD工作过程的主要环节包括信号电荷的产生、存储、传输和检测。这一过程确保了高质量的图像捕捉和传输,使CCD在图像传感领域具有广泛的应用。

3) CMOS——互补金属氧化物半导体

互补金属氧化物半导体制造技术与一般计算机芯片的制造技术没有太大差别。它是一种利用电压控制的放大器件,主要采用硅和锗这两种元素制作成半导体,使其在CMOS上共存着带N(负电)和P(正电)极的半导体。这两个互补效应所产生的电流可被处理芯片记录和解读成影像。CMOS是组成数字集成电路的基本单元。

CMOS制造工艺被广泛应用于制作数码影像器材的感光元件,常见的有TTL(transistor-transistor-logic,晶体管-晶体管逻辑电路)和CMOS,尤其在片幅规格较大的单反数码相机中。虽然在用途上与过去CMOS电路主要作为固件或计算工具的用途非常不同,但基本上它仍然采用CMOS工艺。只是将纯粹逻辑运算的功能转变成接收外界光线后转化为电能,再通过芯片上的模-数转换器将获得的影像信号转变为数字信号输出。

相对于其他逻辑系列,CMOS逻辑电路具有以下优点。

(1) 允许的电源电压范围宽:方便电源电路的设计。

(2) 逻辑摆幅大:使电路抗干扰能力强。

(3) 静态功耗低:在静态状态下功耗非常低。

(4) 输入电阻极大:由于隔离栅结构,使CMOS器件的输入电阻极大,从而使CMOS器件之间驱动同类逻辑门的能力比其他系列强得多。

本实训采用彩色CMOS作为接收模块,充分发挥CMOS器件的优势,确保设备在性能和效率方面达到最佳状态。

3. 光谱仪常用的几种光源

目前,光谱仪常用的光源有氙灯、钨灯、氘灯、汞灯、LED。

1) 低压气体放电光源——氘灯(D₂ lamp, deuterium lamp)

氘灯通过直流电弧激发氘气(D₂)放电,属于高电压、热光源。其发射波长范围为110~900nm。通常采用的是190~400nm的波段,因为在这一波段氘灯的发射光谱比较平滑连续,没有锐线发射。然而,在500nm、600nm和650nm处,氘灯有强烈的锐线发射,因此不适用于可见光区。氘灯的玻璃罩采用特殊的紫外玻璃或石英玻璃制作,以避免普通玻璃对紫外光的吸收。即便如此,紫外玻璃的透射下限约为190nm,而石英玻璃的透射下限大致在150nm。

2) 热发射光源——钨灯(tungsten lamp)

钨灯最初的灯泡内被抽真空,以防止钨丝的氧化和蒸发,后来改为充入惰性气体。充入少量卤素(如碘、溴)可以通过卤-钨循环改善钨丝的老化,使灯泡使用寿命延长。因此,钨灯通常被称为卤钨灯(如碘钨灯或溴钨灯)。钨灯的发射波长范围为 $300\text{nm}\sim 2.5\mu\text{m}$,常用作紫外至可见光谱的光源,特别是在可见光区域。

3) 气体电弧放电发光——氙灯(xenon lamp or xenon arc lamp)

氙灯具有稳定的发射光谱,且使用时间延长后变化较小,光谱分布与自然光接近,波长范围为 $300\sim 1100\text{nm}$ 。氙灯典型的发射光谱分布如图 3-2 所示。氙灯在紫外光区的发射强度较低。由于氙灯的发射光谱相对平滑,没有强烈的锐线发射,因此适用于定量分析的荧光光谱仪。氙灯内充有的氙气气压为 $4\sim 6\text{MPa}$,使用寿命为 $1500\sim 2000\text{h}$ 。氙灯在紫外和可见区光谱效果良好,但价格相对较高。

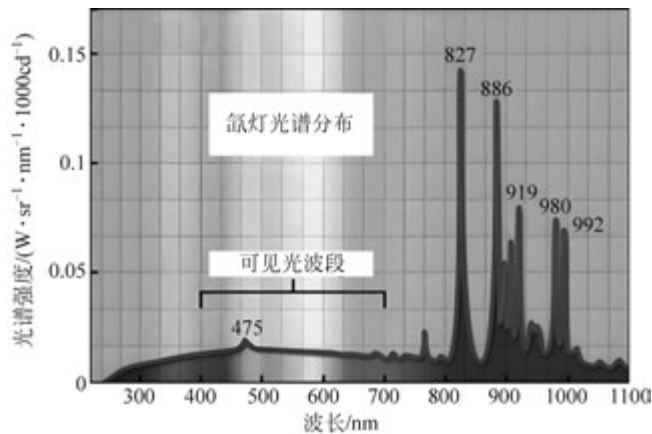


图 3-2 氙灯典型的发射光谱分布

4) 蒸气电弧放电——高压汞灯(high-pressure mercury lamp)

高压汞灯发光强度较强,约为相同功率卤钨灯的几十倍;有大量的锐线发射峰,在这些波长处的发射强度更大;使用寿命较短,通常约为 200h ,汞灯的典型发射光谱分布如图 3-3 所示。

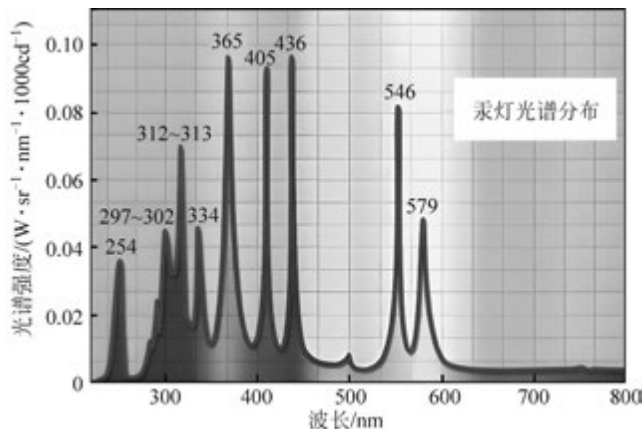


图 3-3 汞灯的典型发射光谱分布



5) 电子与空穴湮灭发光——发光二极管(light-emission diode, LED)

LED光源相比上述白光光源具有更好的单色性,可以根据需要选择合适波长的LED光源。其光谱带宽通常在50nm左右。LED光源具有优异的稳定性,寿命可达数万小时。

本实训采用白光LED作为测试光源。

4. 光纤光谱仪原理与结构

普通数字光谱仪通常由入射狭缝、准直镜、色散元件(光栅或棱镜)、聚焦光学系统和探测器构成。在传统光谱仪结构的基础上,通过采用特殊的微型晶片光学结构,并改进传统光谱仪的准直面镜-平面光学结构-聚焦面镜的设计架构,以单一元件和最小体积实现分光 and 聚焦功能的新型数字光谱仪应运而生。这种光谱仪具有波长探测范围广、高稳定性、可编程控制、紧凑设计、便于携带和测量等优势。普通数字光谱仪和新型数字光谱仪的内部结构示意图如图3-4所示。

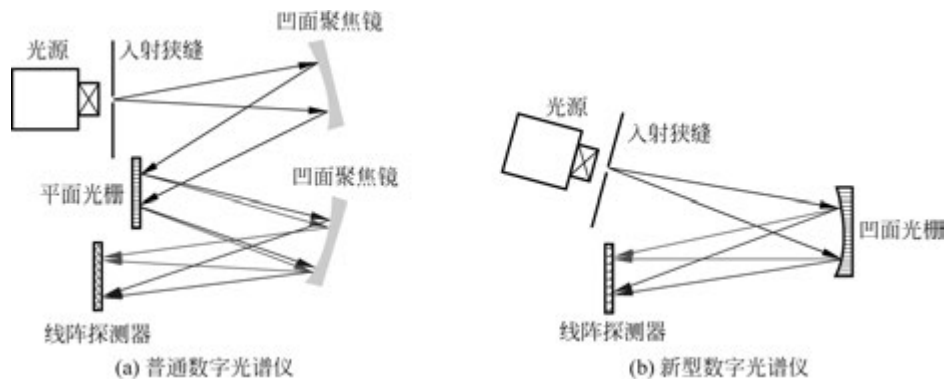


图 3-4 普通数字光谱仪与新型数字光谱仪结构比较

新型数字光谱仪的优势在于其测量系统的模块化和灵活性。为方便灵活测量,新型数字光谱仪使用了低损耗石英光纤,可以将被测样品产生的信号光传输到光谱仪中,连接方便,耦合效果良好。

实验中使用的微小型光纤光谱仪具有极快的测量速度,适合用于在线分析。由于光纤光谱仪使用光纤传导光信号,有效屏蔽了工作环境中的杂散光,从而提高了光学系统的稳定性,使其适用于较恶劣环境的现场测试。

光谱分辨率是衡量数字光谱仪性能的重要指标。它是指光谱仪能够分辨开的最小波长差。为了分辨两个相邻的谱线,这两条谱线在探测器上的像至少间隔两个像素。分辨率通常与色散光栅和入射狭缝有关。色散光栅决定了不同波长在探测器上可以分开的程度,因此它是决定光谱仪分辨率的关键参数。狭缝则决定了入射光束的宽度,其宽度也会影响光学分辨率。一般来说,光栅的线对数越高,色散效应随着波长变化越显著,波长越长,色散效应越大,因此在最长波长处会得到最高分辨率。同样,在其他参数不变的情况下,狭缝越窄,分辨率越高。

5. 色彩描述

目前,色彩描述方法分为定性描述的显色系统表示法和定量描述的混色系统表示法两种。

(1) 显色系统表示法。显色系统根据色彩的心理属性,即色相、明度和饱和度(或彩



度),进行系统分类排列。在显色系统中,首先定义色相,这是颜色的基本特征,用于判断物体颜色是红、绿、蓝等不同颜色。物体的色相取决于光源的光谱组成和物体表面选择性吸收后所反射(透射)的各波长辐射对人眼所产生的感觉。物体的色相取决于光源的光谱组成以及物体表面对不同波长辐射的选择性吸收和反射(或透射),从而影响人眼的感知。接着定义明度,即物体色调的相对亮度,是人眼感知的色彩明暗程度。最后定义饱和度,表示某一色调相对于中性灰色的偏离程度。常用的显色系统有孟塞尔表色系统、瑞典的自然色系统、德国国家标准表色系统等。目前在世界各国的印刷业中,采用最多的是色谱和油墨色样卡。

孟塞尔表色系统是最具代表性的显色系统之一。它通过色卡按色相、明度和彩度三种属性,采用等间隔排列的方式表示色彩。色卡使用圆筒坐标系表示,纵轴表示明度(V),圆周方向表示色相(H),半径方向表示彩度(C)。

(2) 混色系统表示法。由于显色系统存在一定的局限性,人们迫切需要一种更精确且对人眼依赖性较低的色彩定量描述系统,因此提出了混色系统。混色系统基于光的混色实验,采用与某一颜色匹配所需的色光混合量对色彩进行定量描述。混色系统也称为三色表色系统,通过三个值表示色刺激。色刺激的光谱分布称为色刺激函数,三刺激值则是由色刺激函数和人眼的光谱响应相结合得出的物理量。因此,三刺激值是一种心理物理量。我们称表示色刺激特性的三刺激值为色度值,用色度值表示的色刺激称为心理物理色。

常用的混色系统包括 CIE 1931 RGB 表色系统、CIE 1931 XYZ 表色系统和 CIE 1976 Lab 均匀表色系统等,如下所述。

① CIE 1931 RGB 表色系统: 1931 年,国际照明委员会(CIE)规定了三原色光的选取标准,即红原色波长为 700nm,绿原色波长为 546.1nm,蓝原色波长为 438.8nm。根据实验,当这三原色光的相对亮度比例为 1.0000 : 4.5907 : 0.0601 或辐射量之比为 72.0966 : 1.3791 : 1.0000 时,就能混合匹配产生等能量中性色的白光 E。因此,CIE 选取该比率作为红、绿、蓝三原色光的单位量,即 $R : G : B = 1 : 1 : 1$,将此时每一原色的亮度值归一化,从而确定标准观察者匹配函数,得到的三刺激值 R、G、B 可以唯一确定具有任意光谱分布的光的颜色。CIE 1931 标准色度系统色品如图 3-5 所示。

② CIE 1931 XYZ 表色系统: 由于 RGB 系统中存在负值,带来了运算上的困难,因此在此基础上,通过坐标变换的方法,选用三个理想化的原色替代实际的三原色,从而将 CIE 1931 RGB 表色系统中的光谱三刺激值和色度坐标变换为正值,选择 X、Y、Z 分别代表三个假想的红、绿、蓝原色。

③ CIE 1976 Lab 均匀表色系统: 均匀表色系统的目的是使色彩设计和复制更加精确、完美,使色彩的转换和校正尺度或比例更加合理,并减少由于色彩空间不均匀带来的复制误差。这是一种最均匀的色彩空间,即在不同位置和方向上,相等的几何距离在视觉上会产生相等的色差。通过将易于测量的空间距离作为色彩感觉差别量,均匀表色系统能够优化色彩复制技术,增强颜色匹配和色彩复制的准确性。

6. 色度测量

1) 光源色和物体色的三刺激值

色度测量是将人眼对颜色的定性感知转化为定量描述,这种描述基于表色系统。色度测量的依然是从印刷品表面反射或透射出来的光谱,基本原理是依据颜色的三刺激值 X、Y、Z 色度计算公式:

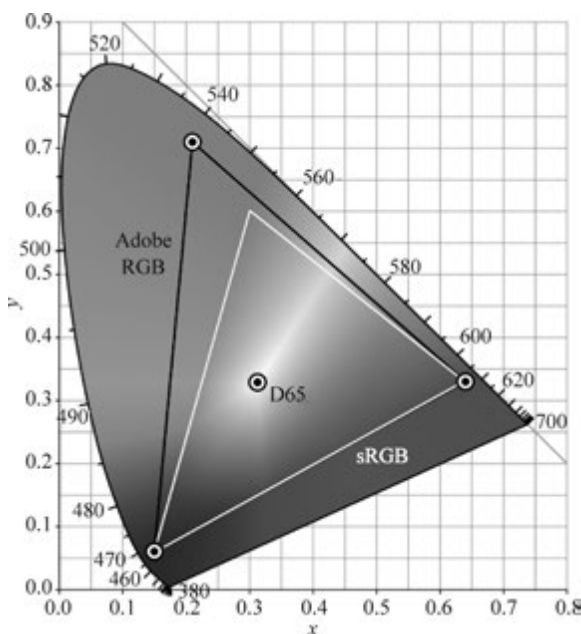


图 3-5 CIE 1931 标准色度系统色品

$$X = k \int \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (3-1)$$

$$Y = k \int \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3-2)$$

$$Z = k \int \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3-3)$$

式中, k 为系数, 定义为 $k = \frac{100}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$; $\Phi(\lambda)$ 为印刷品的色刺激, 对于反射物体为 $\Phi(\lambda) =$

$\beta(\lambda)S(\lambda)$, 透射物体为 $\Phi(\lambda) = \tau(\lambda)S(\lambda)$, 其中, $S(\lambda)$ 为照明的光谱分布, $\beta(\lambda)$ 为反射物体的光谱反射率, $\tau(\lambda)$ 为透射物体的光谱透过率。对于光源色, 颜色刺激函数为 $\Phi(\lambda) = S(\lambda)$ 。

2) 表征颜色特征的两个量——主波长和色纯度

(1) 主波长: 颜色的主波长是以一定比例与参考白光相混合匹配出该颜色的光谱色的波长, 常以 λ_d 表示。颜色的主波长与色调大致相对应, 在不同明度下色调相同的颜色有稍不同的主波长。

(2) 色纯度: 色纯度表示颜色接近主波长光谱色的程度。色纯度有两种表示方法, 一种是刺激纯度, 另一种是亮度纯度。下面介绍刺激纯度。

刺激纯度是指一种颜色可以被看成是一种光谱色与参考白光以一定比例的混合色, 其中光谱色的三刺激值总和与混合色三刺激值总和的比值 P_e 就能表示颜色接近光谱色的程度, 定义 P_e 为颜色的刺激纯度:

$$P_e = \frac{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}{X + Y + Z} \quad (3-4)$$

式中, X_λ 、 Y_λ 和 Z_λ 为颜色所包含的主波长光谱色的三刺激值; X 、 Y 和 Z 为颜色的三刺激

值。假定颜色中所包含的参考白光的三刺激值为 X_0 、 Y_0 、 Z_0 ，根据颜色叠加原理有：

$$X = X_\lambda + X_0 \quad (3-5)$$

$$Y = Y_\lambda + Y_0 \quad (3-6)$$

$$Z = Z_\lambda + Z_0 \quad (3-7)$$

所以色纯度公式可以更改为：

$$P_e = \frac{X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda}{(X_\lambda + Y_\lambda + Z_\lambda) + (X + Y + Z)} = \frac{C_\lambda}{C_\lambda + C_0} \quad (3-8)$$

式中， C_λ 为颜色所包含的主波长光谱色的三刺激值的总和； C_0 为参考白光三刺激值的总和。从色品图上按重心的方法确定 C_λ 和 C_0 有：

$$\frac{C_\lambda}{C_0} = \frac{PQ}{QR} \quad (3-9)$$

经比例变换，有：

$$\frac{C_\lambda}{C_\lambda + C_0} = \frac{PQ}{PR} \quad (3-10)$$

由此，可以根据颜色、主波长光谱色和参考白光色品坐标计算色纯度。

7. CIE 标准照明体及标准光源

为了统一测量标准，国际照明委员会(CIE)规定了标准照明体和标准光源。CIE 对光源和照明体的定义分别为：光源是指能发光的物理辐射体，如灯和太阳；照明体是指特定的相对光谱功率分布，这种相对光谱功率分布不一定能由一个具体的光源实现，而是以数据表格形式给出。CIE 规定了标准照明体和标准光源的光谱分布。

CIE 标准照明体包括 A、B、C、E 和 D，如下所述。

(1) 标准照明体 A 代表绝对温度 2856K(1990 年国际实用温标)的完全辐射体的辐射。其色品坐标位于 CIE 1931 色品图的黑体轨迹上。

(2) 标准照明体 B 代表相关色温约为 4874K 的直射日光，其光色相当于中午的日光，色品坐标靠近黑体轨迹。

(3) 标准照明体 C 代表相关色温约为 6774K 的平均昼光，其光色近似于阴天的天空光，色品坐标位于黑体轨迹下方。

(4) 标准照明体 E 在可见光波段内，具有恒定光谱功率，又称为等能光谱或等能白光。这是一种人为规定的相对光谱功率分布，实际中不存在。

(5) 标准照明体 D 代表各时相日光的相对光谱分布，称为典型日光或重组日光。典型日光与实际日光的相对光谱功率分布非常接近，比标准照明体 B 和 C 更符合实际日光的色品。CIE 推荐了几种特定的相对光谱功率分布作为在光度与色度计算和测量中的标准日光，如 D65、D55 和 D75 代表的相关色温分别为 6504K、5503K 和 7504K。CIE 建议尽可能使用 D65 代表日光，在不能用 D65 时可使用 D55 和 D75。

CIE 标准光源包括 A、B、C 和 D65。

(1) 标准光源 A 由色温 2856K 的透明玻璃充气钨丝灯实现，模拟标准照明体 A。如果需要准确模拟紫外部分的相对光谱功率分布，推荐使用熔融石英玻璃壳或带石英窗口的灯泡。

(2) 标准光源 B 和 C 由标准光源 A 加上各自特定的一组戴维斯-吉伯逊(Davis-Gibson)液



体滤光器组成,用于实现标准照明体 B 和 C。

(3) 对应于标准照明体 D, CIE 尚未推荐相应的标准光源,因此标准照明体 D 的模拟成为当前光源研究的重要课题之一。目前模拟 D65 标准照明体的人工光源有带滤光器的高压氙灯、带滤光器的白炽灯和带滤光器的荧光灯,其中带滤光器的高压氙灯模拟 D65 照明体效果最好。

【内容步骤】

1. 光谱色散套件系统搭建

1) 实验器件

本实训同轴光谱色散套件器件清单如表 3-1 所示。同轴光谱色散套件系统实物如图 3-6 所示。

表 3-1 同轴光谱色散套件器件清单

名称	规格	数量
多孔固定板	—	1
地脚	—	1
单轴支撑座	40mm 中心高	2
不锈钢杆	200mm	2
不锈钢杆	L25mm	2
LED 夹持器		1
固定架	$\phi 30\text{mm}$ 内径	4
可调狭缝		1
遮光套筒	L15mm 长	1
通用转接圈	10mm 厚	1
白光 LED 光源	白光,功耗 3W	1
彩色数字摄像机		1
毛玻璃片	$\phi 25.4\text{mm}$	1
金属边框平凸透镜	$\phi 25.4\text{mm}, f 30\text{mm}$	2
金属边框平凸透镜	$\phi 25.4\text{mm}, f 75\text{mm}$	1
同轴干板架		1
一维光栅	100L/mm	1



图 3-6 同轴光谱色散套件系统实物



2) 实验系统安装

毛玻璃安装示意如图 3-7 所示,先将转接镜架上的压圈拧下,将毛玻璃片放入其中,再将压圈拧紧。



图 3-7 毛玻璃安装示意

主体结构安装示意如图 3-8 所示,安装步骤如下:首先将 LED 放入 LED 夹持器,并锁紧顶丝固定;将毛玻璃放入单轴支撑座,锁紧顶丝固定;将 $f=30\text{mm}$ 的缩束透镜放入固定架中,锁紧顶丝固定;将 $f=75\text{mm}$ 的准直透镜放入固定架中,锁紧顶丝固定;将 $100\text{L}/\text{mm}$ 的透射式光栅放入同轴干板架上并锁紧;将 $f=30\text{mm}$ 的成像透镜放入单轴支撑座,锁紧顶丝固定;将相机遮光套筒拧到相机上,之后将其穿入两个固定架,锁紧顶丝固定。随后将两根 $L=200\text{mm}$ 的不锈钢杆穿入各元器件下侧的两个孔中,并通过拧紧各元器件上的锁紧螺钉固定,元器件的顺序依次为 LED 光源、毛玻璃、缩束透镜、可调狭缝、准直透镜、透射式光栅、成像透镜、相机。最后将两根 $L=25\text{mm}$ 的不锈钢杆穿入 LED 光源夹持器上侧的两个孔中并固定,以达到更好的稳定性。主体结构安装完成效果如图 3-9 所示。



图 3-8 主体结构安装示意



图 3-9 主体结构安装完成效果

将主体结构安装在多孔固定板上,步骤如图 3-10 所示,将主体结构通过 $M6\times 16$ 的内六角螺钉固定多孔固定板上。成品实物如图 3-11 所示。

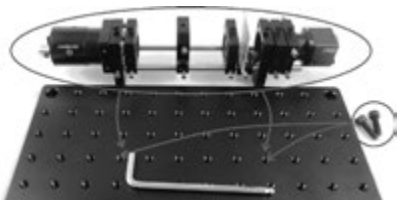


图 3-10 多孔固定板上安装的主体结构



图 3-11 成品实物