

# 《半导体照明技术》实验指导书

深圳大学光电工程学院

2016年12月

# 半导体照明技术实验

## 实验 1 光源与光度辐射度参数的测量

### 实验目的：

通过用棱镜等器件对发白光的 LED（发光二极管）发出的光进行分光测量和对光电综合实验平台上所用光源发出光进行照度测量的实验。学习光本性的基本常识，巩固“光电技术”教科书中第一章关于光的度量内容，并掌握光电综合实验平台所用光源的发光特性；通过对光源照度的调节与测量，熟悉进行光电实验过程中所用数字仪表使用方法，为后面实验做技术准备。

### 实验仪器：

- ① 光电综合实验平台主机系统 1 台；
- ② 60° 分光棱镜及其夹持装置各 1 个；
- ③ 焦距  $f=50\text{mm}$  的透镜及其支架 1 只；
- ④ 发白光的 LED 平行光源（远心照明光源）及其夹持装置各 1 个；
- ⑤ 狭缝及其夹持装置各 1 个；
- ⑥ 像屏及其夹持装置各 1 个；
- ⑦ 磁性表座 4 个；

### 实验内容：

- 1) 棱镜对“白光”的分光特性；
- 2) 掌握分光光谱的分布规律；
- 3) 测量远心照明光源在不同位置上的照度；

### 实验步骤：

#### 1) 棱镜分光实验

##### ① 认识实验所用器件

从光电综合实验平台备件箱中取出如图 2.1-4 所示的分光棱镜、棱镜安装调整机构、发白光的 LED 远心照明光源、可调狭缝与像屏。将这些器材按如图 2.1-5 所示的方式安装在光学实验台上。打开实验平台上的电源开关，将远心照明光源的电源线接到平台的 +5V(VCC) 电源上（注意其极性，红插头接 VCC），使 LED 光源发出一束白色平行光，然后，在光路中插入可调宽度的狭缝，使通过狭缝形成的窄条白光投射到分光棱镜的工作面上，调整（旋转）

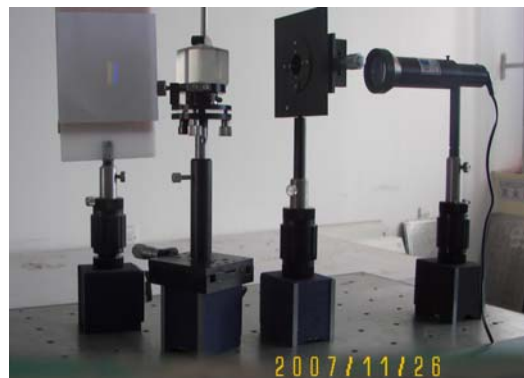


图 2.1-5 棱镜对白光的分光实验装置

分光棱镜，改变白光的入射角，再移动像屏位置，观察窄条白光被分光的现象，将有彩色条形光带从棱镜的另一个工作面发射出去。若像屏位置合适，在像屏上将观测到彩色条带。分析各种彩条带的颜色分布规律，记录各色彩条的排列顺序。

若将 50mm 焦距的透镜安装在棱镜与像屏之间，并适当调整透镜与棱镜之间的距离  $L$ ，与透镜与像屏之间的距离  $L'$ ，观察像屏上彩条的变化。分析变化的原因。

## 2) 观测发光二极管经光栅分光后的光谱分布 (\*此项内容不做\*)

将图 2.1-6 所示的白光 LED 光源换成发蓝光、绿光和发红光的光源，观察此时像屏上色带变化。分析并记录色条的颜色和位置的变化，说明位置变化的原因。通过该实验要充分认识 LED 光源的光谱分布特性与光谱谱线位置与波长相关的概念，为学习光栅光谱仪器奠定基础。

## 3) 发光二极管电流与亮度的关系

从实验平台备件箱中取出各种单色 LED 发光管与通用实验装置，把 LED 发光二极管插入通用实验装置，构成 LED 光源，把照度计的探测头与 LED 光源相对按着如图 2.1-7 所示的结构安装在光学台上，将它们它们的引线和电流表按如图 2.1-8 所示的电路连接成测量电路，在测量电路中调整电阻用  $50\ \Omega$  固定阻值电阻与  $1\text{k}\ \Omega$  电位器相连接，便于调整流过 LED 发光管的电流  $I_{\text{LED}}$ 。在发光二极管的供电电路中串入数字电流表，测量流过 LED 的电流  $I_{\text{LED}}$ 。

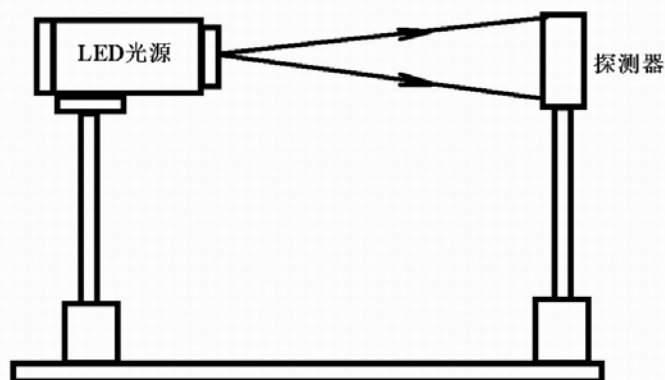


图1-6 测量LED照度的实验装置

打开实验平台的电源开关，在发光管未点亮时测出暗背景照度

$E_{\text{vb}}$ ；然后，通过串入发光二极管的  $1\text{k}\ \Omega$  电位器调节发光电流  $I_{\text{LED}}$ ，记录不同发光电流  $I_{\text{LED}}$  下的光照度  $E_{\text{v}}$ ，将其填入表 2.1-1；改变 LED 与光电探测头间的距离，再重复进行上述实验，分析数据变化的原因。将 LED 与光电探测头间的距离  $L$  锁定，找出电流  $I_{\text{LED}}$  与照度间  $E_{\text{v}}$  的关系。

### 关机与结束：

- ① 所测的数据及实验结果（包括实验曲线）保存好，分析实验结果的合理性，如不合理，则应重新补作上述实验；若合理，可以进行关机；
- ② 将实验平台的电源关掉，再将所用的配件放回配件箱；
- ③ 将实验所用仪器收拾好，再请指导教师检查，批准后离开实验室。

## 实验 2 LED 光谱特性的测试

### 实验目的：

LED 灯的特性直接关系到它的应用，尤其是它的发光强度分布特性与光谱特性是人们普遍关心的重要特性，也是难于测量的特性。光源的光谱内含有丰富的信息，为此人们研制出各种光谱探测器进行物质化学成分的分析。安排这个实验有助于学生了解 LED 发出的光谱成分，并深入掌握光谱探测器的特性，更合理地运用它于分析不同光源的光谱。

### 实验仪器：

- 1) 光电综合实验平台主机；
- 2) 发光光谱测试仪；
- 3) 发出不同颜色光的被测 LED 器件；

### 实验内容：

LED 发光光谱特性既有别于 LD（半导体激光器）又有别于钨丝灯等热辐射体的发光，它的单色性远不如 LD，但是光谱范围是有限宽度的，具有较好的单色性，当然通过二次光致发光获得的“白光”LED 的光谱较为丰富，但是仍然无法与钨丝灯等热辐射体的发光光谱相比。描述 LED 发光光谱特性的方法是测量它的光谱辐射带宽与功率分布。不同颜色与种类的 LED 发出的光谱辐射带宽与功率分布差异很大。在用 LED 构成大屏幕显示器应用领域为获得不同颜色的显示效果，必须对所用的 LED 器件进行光谱特性的测量，以便正确地配制出各种颜色的图案。

### 实验步骤：

#### （1）熟悉测量仪器

LED 光源光谱分布测量的实验要用到 LED 光谱分布测试仪，它的外形图如图 1.2-1 所示，其原理结构如图 1.2-2 所示。被测 LED 安装到 LED 光谱分布测量仪右侧的暗室内，它发出的光经过狭缝入射到反射光栅上，经反射分光后发出多色光带光谱，再经凹面反射镜汇聚到线阵 CCD 的像敏面上。CCD 采集并输出载有 LED 光谱信息的信号电压，再经数据采集卡将其转换成数字信号送入计算机，在计算机软件的支持下形成的谱图显示在显示器上，其中的横坐标为以 nm 为计量单位的波长（ $\lambda$ ），纵轴为 16 位二进制数（0~65535）。



图 1.2-1 LED 光谱分布测试仪

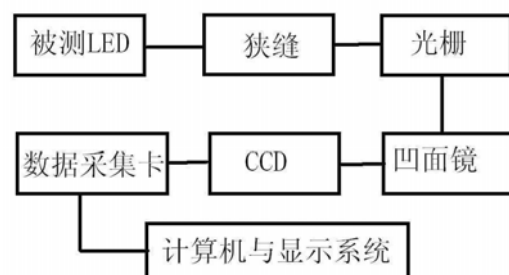


图 1.2-2 LED 光谱仪原理框图

光谱分布测试仪的右端是 LED 发光管的安装机构，由如图 1.2-3 所示它由 LED 灯座、固定套与外圈等三部分构成，将 LED 的两个电极插入 2 个插孔（注意标有白色标记的插孔插较长的正极）后，先将定位套套住 LED，然后再将外套拧在 LED 灯座上，旋紧顶丝。



图 1.2-3 LED 灯安装结构图

再将 LED 灯拧到右边的可调狭缝上的螺纹口上。

## (2) 构成测量系统

实验时，先将 LED 光谱分布测试仪用 USB 连接线与计算机的 USB 端口（光电综合实验平台的 USB 接入端口）相连接，再将电源线插到 AC220V 电源板上，如果只测量 LED 的光谱，则先将仪器右侧的 LED 安装装置拧下，将被测的 LED 插入管座，再将其拧在一起，将直流电源连接线接入仪器右侧的电源插口中便完成了测量系统的安装。

## (3) 开机与测量

开机时，先开光谱仪的电源，然后再启动计算机，查看是否安装了测量软件？若没有安装，请按光谱仪软件安装说明书提示的步骤安装软件，软件安装后，可以直接执行光谱采集软件，弹出光谱分布测量程序界面，界面的上层菜单为基本操作控制主菜单，它与通用“word”文档内容相同，而最下边一行的菜单为操作菜单，其中“打开”与“保存”菜单是对文档进行打开与保存的操作，“打开”已经保存的文档与“保存”现在正在执行的结果文档；“曲线”菜单是将 CCD 采集到的光谱信号以波形曲线方式显示在界面上；“数据”菜单是将 CCD 采集到的数据按一定的数据格式显示在界面上；“连续”菜单是执行菜单，点击“连续”菜单，在计算机显示屏上将显示出如图 1.2-4 所示的黄色 LED 发出光谱的分布曲

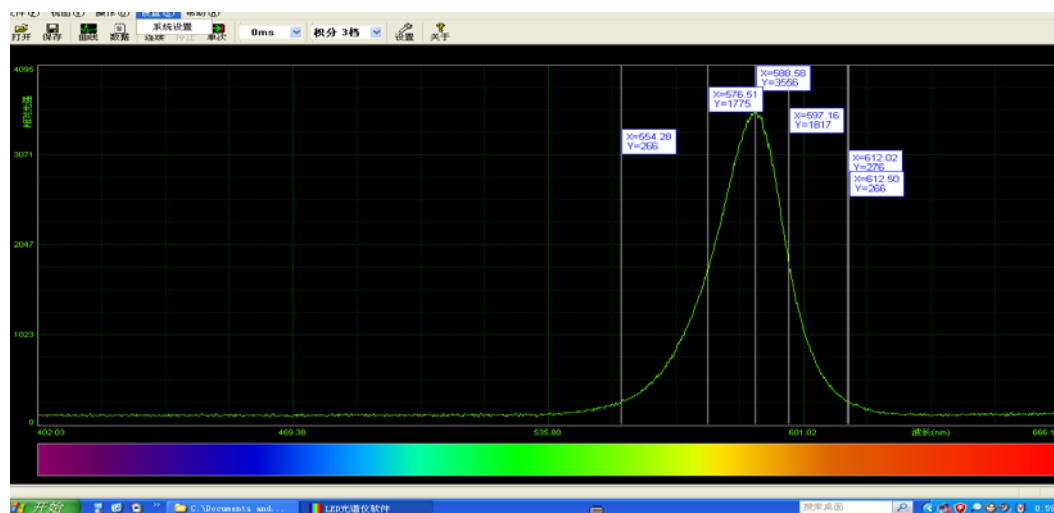


图 1.2-4 黄色 LED 的光谱分布

线。“停止”菜单是执行停止采集的操作，点击“停止”菜单后，CCD 的采集工作将停止，界面上显示点击“停止”菜单后的结果曲线；“单次”菜单也是执行菜单，点击它以后，线阵 CCD 只采集一行信号，并将这一行信号以波形曲线的方式显示在界面上；“0ms”菜单是控制所采集到的光谱在界面上停留的时间，点击这个菜单，可以弹出不同的时间选择，改变光谱曲线在界面上停留的时间。“积分 3 档”是控制线阵 CCD 积分时间参数的功能菜单，当前选择的为积分时间是“第 3 档”。点击它可以弹出多种积分时间的选择菜单，实现对不同强度光谱的观测；“关于”菜单是注释菜单，对光谱测量没有关系。

测量光谱分布曲线时，在设定好显示时间与积分时间后，可执行“连续”菜单，界面出现便于观察的光谱特性曲线后，可执行“停止”菜单，使界面上的光谱曲线不再变化，通过“数据”菜单可以读到每个像元的光谱强度值。另外，也可以将“鼠标”标记放到所选波形的特征点（所需要测量的点）位置，再点击鼠标右键，弹出测量标线如图 1.2-4 所示的白色标线，在标线的上方分别显示 x 与 y 坐标值，其中 x 值为横坐标（光谱的波长），y 为其强度（16 进制数值）的数值。利用这一功能可以测量光谱的峰值波长与光谱带宽等参数。

#### （4）LED 发光光谱半宽度的测量

LED 发光光谱半宽度的定义为光谱分布曲线的幅度衰减到 1/2 所对应的谱线宽度。测量时，先将整个光谱曲线计算机界面上显示出来，然后，找出光谱分布曲线的幅度（垂直坐标）衰减到 1/2 所对应的位置上点击鼠标右键，弹出如图 1.2-4 所示的白色测量线和相应的 x, y 坐标，LED 光谱辐射半宽度的带宽  $\Delta \lambda$  既为

$$\Delta \lambda = x_2 - x_1 \quad (1.2-1)$$

如图 1.2-4 所示的半波带宽  $\Delta \lambda$  为  $(597.15 - 576.51) = 20.64\text{nm}$ 。由于光谱仪在出厂之前已经用汞灯的标准谱图进行了严格的标定。如果用户没有标准汞灯谱图，则不能再自行进行标定。如果用户有条件进行标定，也可以自行进行标定。但是，自己进行标定应当承担由此带来的误差责任。

#### （5）文件的存储与打开

通过执行“保存”菜单，能够将计算机界面上显示的光谱分布曲线以文本方式或图像方式保存到文件夹内，它即为 LED 的光谱辐射分布曲线图。通过执行“打开”菜单，能够将以前存储在某个文件夹内的光谱分布曲线打开并显示在界面上。

#### 关机与结束：

- 1、将所测的数据及实验结果（包括实验曲线）保存好，分析实验结果的合理性，如不合理，则要重新作上述实验；若合理，可以关机；
- 2、先退出计算机软件，关掉计算机电源，再将实验平台的电源关掉；
- 3、最后，将所用的配件放回配件箱；将实验所用仪器收拾好后，请指导教师检查，批准后离开实验室。
- 4、分析上述实验过程中为什么要旋转被测 LED？如何能找到 LED 的真正光轴？
- 5、LED 发光强度的改变是否影响它的光谱分布？为什么？

## 实验 3 LED 角度特性参数测量实验

### 实验目的：

LED（发光二极管）是非常有发展前景的半导体发光器件，是将来取代钨丝灯、日光灯、照明灯、高压汞灯与其他系列灯具的节能替代产品。LED 灯的特性直接关系到它的应用，尤其是它的发光强度的空间分布特性是人们普遍关心的重要特性，安排这个实验有助于我们深入掌握它的特性，更合理地应用它为人类照明与视觉效应服务。

### 实验仪器：

- ① GDS-III型光电综合实验平台 1 台；
- ② LED 发光特性测试仪 1 台；

### 实验内容：

#### 1) 发光强度空间分布特性与偏差角 $\theta$

根据中国光学光电子行业学会 2002 年制定的“发光二极管测试方法”，LED 发光强度的空间分布特性是指器件发射出的光强  $I_V$  或  $I_e$  参数与空间方向角  $\theta$  的函数关系  $I_V=f(\theta)$ 。

显然， $\theta$  角度一般取为 LED 器件的“机械角”，机械角的定义为器件几何尺寸的中心线或法线为其零度角。由于 LED 封装工艺问题使 LED 器件存在发出光强度最大的方向（称为主光线）与机械轴并不重合，产生如图 1.3-1 所示的偏差  $\Delta\theta$ ，称其为偏差角或偏向角。测量偏向角对于正确使用 LED 为光源，尤其是使用 LED 群构成面光源或彩色图像显示中具有非常重要意义。

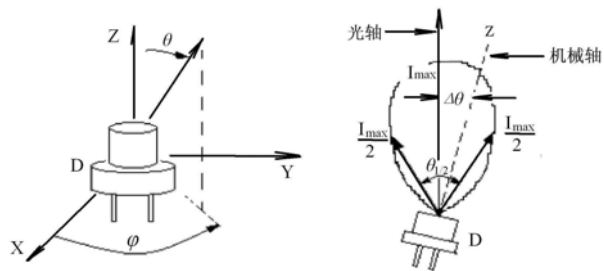


图 1.3-1 LED 发光的空间分布特性

#### 2) 半发光强度角 $\theta_{1/2}$

如图 1.3-1 所示，LED 的另一个重要参数是“半发光强度角  $\theta_{1/2}$ ”，半发光强度角  $\theta_{1/2}$  是描述 LED 发光范围的参数。为获得更宽，更均匀的面光源，总希望 LED 半发光强度角  $\theta_{1/2}$  更大些，而有些应用场合希望 LED 能够将光投射到更远的地方，或在更远处获得更强的照度，则又要求 LED 的半发光强度角  $\theta_{1/2}$  尽量小，使光能量不至于太分散而损耗过大。为满足不同应用的要求，生产出多种不同封装形式的 LED 器件，以便满足不同应用对 LED 半发光强度角  $\theta_{1/2}$  的需求，获得理想的效果。

## 实验步骤:

### (1) 熟悉 LED 发光角度特性测试仪

如图 1.3-2 所示为 YHLA-II 型 LED 发光角度特性测试仪的外形图, 它由 LED 安装夹具 (右侧)、标准立体角光电接收装置 (接收筒)、角度读出度盘、光电探测器输出数字电压表 (左面第 1 块数字电压表)、跨接在 LED 两端的数字电压表、串联 LED 中的数字电流表、控制 LED 工作电流大小的调整旋钮、控制 LED 工作电压的调整旋钮、控制 LED 的工作电压极性的转换开关 (正、反向切换按键) 和电源开关等部件构成。

LED 安装夹具主要用来安装被测 LED 发光管, 使 LED 管芯发光部位恰好在读数度盘的回转中心上。度盘的刻度位于回转度盘前方窗口的下方 (读数窗), 便于操作者随时读取转角的刻度。LED 安装夹具的上方有一个锁紧顶丝, 松开顶丝后 LED 灯可以前后调动和转动, 使 LED 灯前 endpoint 能够置于机械回转中心上。

光电接收装置 (接收筒) 中安放一只直径 17mm 的硅光电池, 它对 LED 发光中心所成的立体角为  $0.001\text{sr}$ , 符合“中国光学光电子行业协会光电器件专业分会”对 LED 发光角度特性测试方法的基本要求。转动度盘, 从度盘前端的角度显示窗口中直接读出 LED 的转角, 为各种角度测试提供准确的数据。



图 1.3-2 LED 发光角度特性测试仪结构图

三块数字表的下方分别有三位切换开关, 对数字电压表或数字电流表的量程进行切换。其中 I 档量程最小, III 档量程最大。由于测量硅光电池输出的数字电压表在实验过程中很难出现高于  $200\text{mV}$  的电压, 因此可以只使用 I 档量程, 其示值 (读数为  $\text{mV}$ )。

### (2) LED 的安装与校准

先将 LED 的两只管脚插入夹具上的两个小孔中 (注意标有黑点的小孔为负极, 应插入较短的管脚), 插入后将便可开机。开机后 LED 被点亮 (如果不亮, 请检查是否差错了管脚), 读电流表的示值, 注意不要超过管子的最大允许电流 (应该控制在  $20\text{mA}$  之内)。可以通过电流调节旋钮进行调节, 调好后, 不再改变。

松开顶丝, 转动 LED 及其夹具, 使左侧电压表的读数最大, 轻轻地拧顶丝, 然后将如图 1.3-3 所示的定位标具插入中心孔, 再旋松顶丝, 使 LED 轻轻地顶到标准具的孔, 然后旋紧顶丝, 撤去标准具。



## (2) 测量 LED 的发光强度分布

### ① 测量机械轴与光轴的偏差角

如图 1.3-4 所示为测量 LED 发光角度特性的实验原理图,图中的三道光栏与硅光电池构成一个空间立体角,空间角的轴线是固定的,记为 PD 轴。LED 发光管的机械轴由其外形尺寸决定, YHLA-II 实验仪的 LED 夹持器具将其机械轴与 PD 轴共轴(用 LED 装置前的定位销钉定位),定位后,度盘的刻度值为  $0^\circ$ 。LED 发出的光只有进入到标准立体角内的一部分才能被硅光电池 PD 所接收。当安装在夹具上的 LED 灯发出的光沿 Z 轴最大

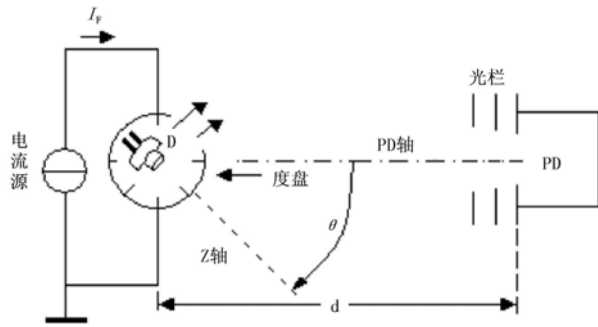


图 1.3.4 LED 发光角度特性测量原理图

时表明它的光轴与机械轴重合,转动旋转度盘使度盘刻度为  $0$ , 观察并读出输出电压值。然后再转动度盘,边转动边读输出电压,当数字输出电压的示值达到极值  $U_m$  时,停止,记录此时度盘的角度  $\alpha_m$ ,  $\alpha_m$  既为 LED 的光轴与机械轴的偏差角。

测量时要注意 LED 发光角的轴线是空间分布的,如何找到 LED 的光轴是很重要的问题,需要旋转 LED,使你所测量的光轴是真正的光轴。

### ② 测量 LED 半发光强度角 $\theta_{1/2}$

半发光强度角  $\theta_{1/2}$  的测量方法与偏差角  $\Delta \theta$  的测量方法极为相似,找到光轴后,记录度盘的角度  $\alpha_m$ , 然后,先顺时针转动手轮,使 LED 绕发光中心顺时针转动,当数字电压表的示值为极值  $U_m$  的一半时,记录此时度盘的角度值  $\alpha_R$ ; 再逆时针转动手轮使 LED 绕发光中心逆时针转动,再使数字电压表的示值为极值  $U_m$  的一半,记录此时的度盘的角度值  $\alpha_L$ , 则 LED 的半发光强度角  $\theta_{1/2}$  应为

$$\theta_{1/2} = (\alpha_R - \alpha_L) \quad (1.3-1)$$

测量 LED 半发光强度角  $\theta_{1/2}$  时也要注意 LED 发光角的轴线是空间分布的,找不准 LED 的光轴就不能测出真实的发光半角,实验过程中应该旋转 LED,使接收器的输出为最大值才能找到真正的光轴。

## 关机与结束:

- 1、将所测的数据及实验结果(包括实验曲线)保存好,分析实验结果的合理性,如不合理,则要重新作上述实验;若合理,可以关机;
- 2、先退出计算机软件,关掉计算机电源,再将实验平台的电源关掉;
- 3、最后,将所用的配件放回配件箱;将实验所用仪器收拾好后,请指导教师检查,批准后离开实验室。

## 实验 4 LED 色温控制实验

### 一、 实验目的

1. 了解 LED 色温实现连续控制的原理和方法。
2. 理解色温、相关色温的概念，主观感觉色温的变化对人体的影响。

### 二、 实验原理

如果人体眼睛受到外界光的刺激，人就会产生特定的主观感受，这个感受被称为颜色。表述光源颜色的方法有很多种，用“色温”的概念表述热辐射光源的颜色是一种准确而简单的方法。作为描述光源和其他物体的光度特性的重要物理量，光源的色温是通过对比其色彩和理论的热黑体辐射(简称黑体，在任何温度下对任何波长的辐射能的吸收率都等于 1 的物体，是一种理想的模型，也叫完全辐射)来确定的。

热辐射发射光源的光谱是连续而光滑的。对黑体而言，温度不同，颜色也不一样。黑体发光的颜色与温度存在唯一的对应关系。色温是颜色温度的简称，在表述某光源的颜色时，常常把该光源的颜色与黑体发光的颜色进行比较。色温是以绝对温度 K (开尔文) 为单位表示的，以黑体辐射的  $0K = -273^{\circ}C$  为起点，加热黑体。随着温度的升高，黑体辐射便进入可见光领域，依次由深红-浅红-橙黄-白-蓝逐渐变化。当某一光源与黑体的颜色相同时，我们将黑体的绝对温度表示为该实际光源的色温。例如，在 3000K 时，灯泡的发光颜色与黑体的发射光相同，我们便称灯泡的色温是 3000K。

黑体发射光的相对光谱功率分布由普朗克定律给出：

$$P(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1)$$

其中： $T$  为黑体的绝对温度 (K)； $\lambda$  为波长 (nm)； $c_1$  为第一辐射常数，即  $c_1 = 3.7417749 \times 10^{-16} Wm^2$ ； $c_2$  为第二辐射常数，即  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot k$ 。

如图 1 所示，在  $x-y$  色度图上，黑体的色温在  $x-y$  色度图上是一条近似弧形的曲线，称作黑体轨迹，也叫黑体曲线或普朗克轨迹线。其中的横轴 X、纵轴 Y，即为颜色的坐标，称为色坐标。我们可以通过色坐标，计算得出光源的色温大小。随着黑体温度的升高，其光谱的分布的最大功率向波长较短的方向移动，光的颜色像蓝色方向变化，其颜色变化顺序依次为红→橙黄→黄→黄白→白→蓝白，色温在 3300K 以下有温暖的感觉，色温在 3000K-5000K 为中间色温，有爽快的感觉，色温在 5000K 以上有寒冷的感觉，不同的色温可以给人不同的生理和心理影响。一般而言，低色温的光源能量分布集中，红光辐射相对多一点，色温增大，蓝光辐射的比例增加。

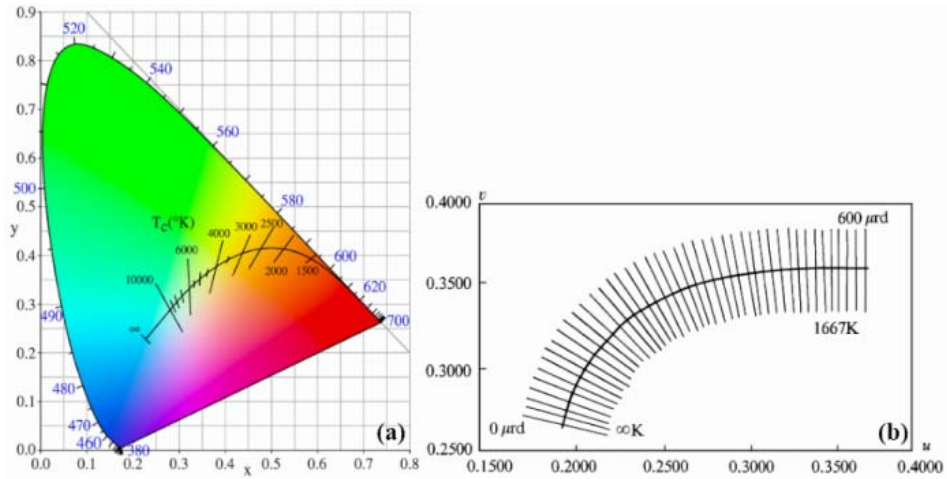


图 1 (a) CIE 1931 x-y 色度图；(b) CIE 1960 UCS 均匀色度图中的黑体色轨迹及等相关色温线

光源	色温(概数)/K	光源	色温(概数)/K
阴天	6800~7500	蜡烛光	2000
中午阳光	5000~5400	钨丝灯	2700
没有太阳的昼光	4500~4800	卤素灯	3000
满月时的月光	4000	电子闪光灯	5600
日出、日落	2000~3000	夜星空	10000

表 1 不同时刻直射阳光与常见人工光源的色温值

通常，任意光源发出的光的颜色与黑体发射光相近，不可能完全相同，所以可用“相关色温”的概念来描述光源的颜色。相关色温是指如果某个光源和某一温度下的黑体拥有相同亮度刺激的颜色，那么光源的相关色温就是这时黑体辐射体的绝对温度值。因为黑体是一种理想化的模型，而实际的光源光谱功率分布不可能和黑体辐射的光谱分布一致，所以实际光源的色度坐标不一定能够准确落在黑体轨迹上。

当表示光源光色的色坐标点落在黑体色轨迹上时，说明该光源的光色与某一温度下的黑体的光色相同，计算出的就是光源的色温值，反之，当表示光源光色的色坐标点落在黑体色轨迹以外时，计算出的就是光源的相关色温值，光源的色坐标点偏离黑体色轨迹线越远，相关色温的概念越弱。对于气体放电灯、高显色 LED 光源灯，其颜色坐标接近黑体轨迹，可以用“相关色温”表述其颜色，相关色温概念具有重要的实际意义。

要实现连续色温的调控，照明系统需要具有足够多的亮度调节功能。目前对灰度进行调制最常用的两种方式包括：(1)脉冲宽度调制(PWM)；(2)脉冲幅度调制(PAM)。对于脉宽调制方式(PWM)，在一个时钟周期内控制流过器件电流的时间长短来调节灰度，驱动电路根据灰度数据输出相应的脉冲宽度，研究表明，光源的平均亮度与电流脉冲宽度成正比，因此，只需将三基色光源各基色的最高灰度值乘上亮度百分比即得所需要的三基色的灰度值数据。

当灰度数据为最高灰度级时，红基色、绿基色、蓝基色均达到最高亮度，假设分别为  $G_{r \max}$ 、 $G_{g \max}$ 、 $G_{b \max}$ ，则所需三基色亮度值  $G_r$ 、 $G_g$ 、 $G_b$  在各基色中所占的比例为：

$$P_r = \frac{G_r}{G_{r \max}}, P_g = \frac{G_g}{G_{g \max}}, P_b = \frac{G_b}{G_{b \max}} \quad (2)$$

在实际应用中，色温或色坐标是通过色度计直接测量的。本实验中将用到色温照度计对色温、色坐标及照度进行测量。色温照度计是照度、色坐标测量的精密仪器，使用过程中应注意仪器的使用安全，切勿将仪器浸泡在水中，不可按压 LCD 显示屏，使用环境保持在 0-50℃，相对湿度 < 80%，长期未使用需将电池拆卸下来，且探测器在长时间照射下会逐渐老化，因而，使用完后应立即盖上探头盖。该色温照度计可进行色温测量和色差测量，即可以测量照度、色坐标或照度、色温，也可以测量照度差、色坐标差或照度差、色差。本实验只用它的色温测量功能。（其它使用说明和注意事项，请参考色温照度计使用说明书。）

### 三、 实验器材

LED 三色灯模块、色温照度计

### 四、 实验步骤

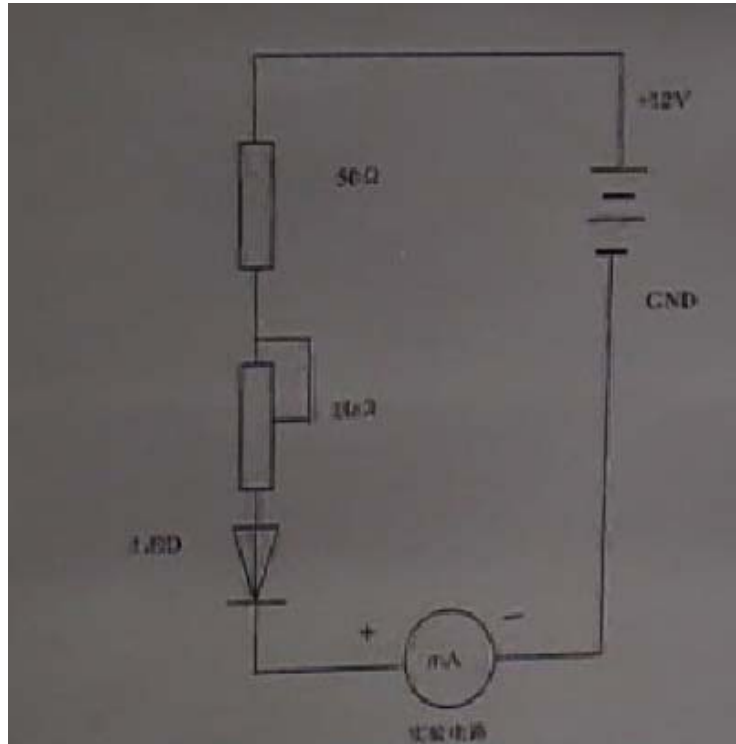
1. 用跳线连接实验箱上 12V 电源正极与 LED 灯模块上的红色接口，负极连接 LED 灯模块上的黑色接口。
2. 顺时针旋转左边的旋钮，打开红色 LED 光源，使其点亮工作。
3. 取出色温照度计，按电源键 2 秒钟，开启电源。按“Unit”键，选择照度单位为流明 (lx)，按“MODE”键选择测量参数为“Ev, CT, Δuv”即“照度、色温”模式，将探头盖取下，并对准 LED 光源，距离 20cm 左右。
4. 旋转旋钮，使 LED 光源变亮，记录此时的照度值和色温值。

	红光			绿光			蓝光		
	电流 (mA)	照度 (lx)	色温 (K) (2000-3000K)	电流 (mA)	照度 (lx)	色温 (K) (5000-8000K)	电流 (mA)	照度 (lx)	色温 (K)
1									-
2									-
3									-
4									-
5									-

5. 分别记录下不同亮度时的照度值和色温值。观察亮度与色温之间的关系，并分析原因。
6. 逆时针旋转左边旋钮直到 LED 灯关闭。
7. 顺时针旋转中间的旋钮，打开绿色 LED 光源，使其点亮工作，重复 3-6 步。
8. 顺时针旋转左侧的旋钮，打开蓝色 LED 光源，使其点亮工作（最微弱的亮度即可），

观测色温照度计上是否有读数？此时尝试将色温照度计慢慢远离光源，观测是否有读数？分析原因。将色温照度计放回原来的距离，测量五组照度值。

（蓝光的色温趋近于无穷大，长期使用色温较高的照明光源，会对人眼造成一定损害。所以现在 LED 行业有指定相关“蓝光危害”行业标准，有兴趣的同学可以自行学习相关知识）。



测草帽型 LED 限流参考电路图（只能使用 LED 光源装置）

## 实验 5 LED 光源 RGB 混色控制实验

### 一、 实验目的

1. 理解颜色混合匹配原理，结合实验加深对理论知识的理解。
2. 了解 LED 实现颜色控制的原理和方法，控制 LED 并混合出所需颜色。

### 二、 实验原理

自然界中所有彩色都可以由三种基本颜色混合而成，这就是三基色原理。三基色是这样的三种颜色，它们相互独立，其中任一种颜色均不能由其它两种颜色混合产生。它们又是完备的，即所有其它颜色都可以由三基色按不同的比例组合而得到。

颜色混合可以是颜色光的混合，也可以是色料的混合，但这两种混合方法的结果是不同的。前者称为相加混合，其基色是红、绿、蓝，混合色光是参加混合各色光之和；后者称为颜色相减混合，其三基色是青、品红(或紫色)、黄，色料混合是从白光中去除某些色光，从而形成新的颜色。不同比例的三基色光相加得到彩色称为相加混色，其规律为：如图 1 所示。实际效果如图 2。

$$\begin{aligned} \text{红(R)} + \text{绿(G)} &= \text{黄(Y)} \\ \text{红(R)} + \text{蓝(B)} &= \text{品红(M)} \\ \text{蓝(B)} + \text{绿(G)} &= \text{青(C)} \\ \text{红(R)} + \text{蓝(B)} + \text{绿(G)} &= \text{白(W)} \end{aligned}$$

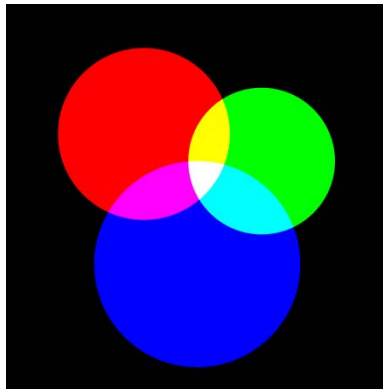


图 1 红绿蓝三原色颜色叠加效果



图 2 RGB 混色显示

由格拉斯曼颜色混合基本规律可知：

- 1) 人的视觉只能分辨颜色的三种变化，它们是明度、色调和饱和度，

明度表示颜色明亮的程度，色调是区分不同彩色的特征，而饱和度则表示颜色接近光谱色的程度，彩色必须具备以上三个特征，特征参数的不同，表示的颜色也不同；

2) 在由两个成分组成的混合色中，如果一个成分连续变化，混合色外貌也连续变化；

3) 颜色外貌相同的光，不管他们的光谱组成是否一样，在颜色混合中具有相同的效果，即凡是在视觉上相同的颜色都是等效的；

4) 混合色的总亮度等于组成混合色的各种颜色光的亮度总和——亮度相加定律。

由颜色匹配实验可知，红、绿、蓝三色不是惟一的能匹配所有颜色的三基色，只要每一种都不能用其他两种混合产生出来，就可以用他们匹配所有的颜色，原则上可采用各种不同的三色组，但为了便于计算和色彩还原以及标准化起见，国际照明委员会(CIE)作了统一规定：选水银光谱中波长为 546.1nm 的绿光为绿基色光；波长为 435.8 nm 的蓝光为蓝基色光，波长为 700nm 的红光为红基色光，此外，红、绿、蓝三种颜色恰与人的视网膜上红视锥、绿视锥和蓝视锥细胞所敏感的颜色一致。

不同材料可以产生不同波长的光子，即不同颜色。采用多芯片 LED 可以产生白光，如图 1 所示，分别选用红光 LED、绿光 LED、蓝光 LED，将其封装在一起产生白光，分别调节红、绿、蓝三色光的比例可得各种色光，发光效率高。若以  $(C)$  代表被匹配颜色的单位， $(R)$ 、 $(G)$ 、 $(B)$  代表产生混合色的红、绿、蓝三原色的单位。 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 、 $C$  分别代表红、绿、蓝和被匹配色的数量，当实验达到两半视场匹配时，可用颜色方程表示为：

$$C(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (3)$$

式中" $\equiv$ "表示视觉上相等，即颜色匹配，为代数量，可为负值。

在颜色匹配实验中，与待测色达到色匹配时所需要三原色的数量，称为三刺激值，即颜色匹配方程(1)中的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值。一种颜色与一组  $R$ 、 $G$ 、 $B$  数值相对应，颜色感觉可通过三刺激值来定量表示。任意两种颜色只要  $R$ 、 $G$ 、 $B$  数值相同，颜色感觉就相同。

根据颜色匹配，颜色 $(c_1)$ 和 $(c_2)$ 均可用三原色的量，即三刺激值来表示。假设颜色 $(c_1)$ 和 $(c_2)$ 的三刺激值分别为 $R_1$ 、 $G_1$ 、 $B_1$ 和 $R_2$ 、 $G_2$ 、 $B_2$ ，则两颜色方程为：

$$C_1(C) \equiv R_1(R) + G_1(G) + B_1(B) \quad (4)$$

$$C_2(C) \equiv R_2(R) + G_2(G) + B_2(B) \quad (5)$$

所以有：

$$\begin{aligned} C(C) &= C_1(C) + C_2(C) = [R_1(R) + G_1(G) + B_1(B)] + [R_2(R) + G_2(G) + B_2(B)] \\ &= (R_1 + R_2)(R) + (G_1 + G_2)(G) + (B_1 + B_2)(B) \end{aligned} \quad (6)$$

颜色 $C(C)$ 也可以用三刺激值 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 表示为：

$$C(C) = R(R) + G(G) + B(B) \quad (7)$$

对照(4)、(5)式可得：

$$R = R_1 + R_2, G = G_1 + G_2, B = B_1 + B_2 \quad (8)$$

由(6)式可知，混合色的三刺激值为各组成颜色相应三刺激值之和，这就是颜色相加原理。

上述原理可以推广到多颜色混合，对  $n$  种颜色混合，混合色的三刺激值为：

$$\left. \begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \\ G &= G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i \\ B &= B_1 + B_2 + \dots + B_n = \sum_{i=1}^n B_i \end{aligned} \right\}$$

### 三、 实验器材

LED 三色灯模块、色温照度计

### 四、 实验步骤

1. 用跳线连接实验箱上 12V 电源正极与 LED 灯模块上的红色接口，负极连接 LED 灯模块上的黑色接口。
2. 顺时针旋转左边及中间旋钮，使三色灯中的“红”“绿”这两种 LED 光源同时工作。观察混合后的颜色变化。
3. 取出色温照度计，按电源键 2 秒钟，开启电源。按“Unit”键，选择照度单位为流明 (lx)，按“MODE”键选择测量参数为“Ev, x, y”即“照度、色温”模式，继续按“MODE”键，选择测量参数为“Ev, u', v'”即“照度、色温 (CIE1960 标准)”模式，将探头盖取下，并对准 LED 光源，距离 20cm 左右。
3. 继续顺时针旋转旋钮，进行调光，调整亮度，观察亮度变化时，混合后的光源颜色变化。并在两种颜色调到最亮时，用色温照度计记录色度学参数。
4. 按照 2、3 步，依次使“红”“蓝”、“绿”“蓝”、“红”“绿”“蓝”光源工作，观察混色后的颜色变化，并记录，与理论值做对比。

模式	色温值		色温值 (CIE1960)	
	x	y	u'	v'
红绿				
红蓝				
绿蓝				
红绿蓝				