

学生园地

## 普通光谱仪用于混色物理实验

陈 思,马世红

(复旦大学 物理学系,上海 200433)

**摘 要:**利用光栅光谱仪测量了加法基色和减法基色的透射光谱,并借助 2 个不同滤波片的组合可以实现减法混色的物理过程.同时,通过实验证明了色光波长会随着入射角增大而向短波长偏移.

**关键词:**光栅光谱仪;减法混色;基色;波长偏移

**中图分类号:** O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4642(2009)06-0038-05

### 1 引 言

混色物理就是研究颜色混合现象的科学.颜色的混合根据原理分为 3 类:加法混色、减法混色和平均法混色.混色物理实际上与日常生活密切相关,如电视电脑屏幕上显示的颜色就是根据平均法混色原理搭配出来的,而绘画、印染颜色的产生则是源自减法混色原理.事实上,运用加法混色、减法混色或平均法混色原理可以产生人类视觉可见的自然界中所有的颜色.

本文在进行了减法基色混色的物理实验基础上,观察到随着滤光片与入射光线的夹角的逐渐增大,发现通过该滤光片的透射光的波长向紫光方向偏移.

### 2 原 理

加法混色、减法混色及平均法混色,是根据色光混合前后,光的能量、亮度关系来区分和命名的.普通光谱仪做混色物理实验,实际运用的是减法混色原理,加法混色和平均法混色实验则需要应用到其他的实验仪器,因此下面将分别叙述 3 种混色过程的原理.

#### 2.1 加法混色

来自 2 个或 2 个以上光源的不同色光同时到达眼睛,即形成加法混色.因为有同时性的要求,因此加法混色的适用范围是有限的.当把 2 束或

多于 2 束的不同色光投射到白纸或白墙上,它们叠加起来并且被白平面散射,这种混合就是加法的混合.

混合后的色光,其能量、亮度等于混合前几束光的能量亮度之和,色调处于原几种色光的色调之间,具体则取决于原来几束光的相对强度.假设 2 束光分别是红光和绿光,则相加混合后的色光,调整红光和绿光之间的相对强度,则可能得到红光和绿光之间任何一种色调的光:黄绿色、黄色、橙色,等等.但是如果 2 束色光差别很大,比如位于色调环上相对位置的红和青、蓝和黄、绿和洋红,适当调整它们的相对强度则会合成白光,此时这 2 种颜色称为互补色.

加法混色的三基色分别为红、绿、蓝.

#### 2.2 减法混色

黄色物体之所以显示出黄色,是由于它吸收了偏蓝波长的光,而反射出的其他波长的光混合在一起即为黄光.同理,白光透过黄色滤波片后,偏蓝波长的光都被滤波片吸收,剩下的透射光合成为黄光.所以,与其说黄色物体反射黄光,不如说黄色物体吸收蓝光更为准确.

减法混色的原理即为对某些波长的光的吸收,比如,白色光线先后通过青色滤波片和黄色滤波片得到绿光,其中即包含了 2 次减法混色的过程.第一次是白光通过青色滤波片,其中的红光被吸收,青光透射过去;第二次是青光通过黄色滤波

“第 5 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2008-07-25

基金项目:国家基础科学人才培养基金资助项目(No. J0730310)

作者简介:陈 思(1985-),男,上海人,复旦大学物理学系 2004 级本科生.

指导教师:马世红(1963-),男,河南温县人,复旦大学物理学系教授,博士,从事功能超薄膜物理与器件、物理实验教学研究.

片,其中的蓝光被吸收,绿光透射过去。以上减法混色的过程可以表示为:青+黄=绿。与加法混色的不同点是:减法混色中2种或多种颜色的合成,其实质是对某些波长光的吸收,要求有先后关系;而加法混色中颜色的合成,其实质就是光的合成,并且要求具有同时性。

利用减法混色也可得到现实中的大部分颜色,如把青、洋红、黄3种颜色混合,调整它们之间的相对强度,就能得到从蓝到蓝绿,到绿黄、橙和红之间的所有颜色。由于是吸收过程,这种混合色光,其能量、亮度与单独的颜色相比都有所削弱。

减法混色原理在生活中运用得很多,涉及色彩的混合都属于减法混色过程,比如绘画颜料、油漆、染料等。由于减法混色过程会降低亮度,导致现实中许多亮度高的彩色就无法配出。为了配出更多更亮丽的颜色,印刷厂会采用多于3种的颜色,而有的彩色喷墨打印机有5种甚至更多的墨水,绘画颜料的颜色种类则更是繁多。

减法混色也有三基色,分别是青、洋红、黄,其实即为绘画中的红、黄、蓝三元色。

### 2.3 平均法混色

平均法混色过程中,色调的确定与加法混色的原则相同,因此也有人把平均法混色归入加法混色之中。然而笔者认为,其原理与加法混色有所不同,得到的混合光的能量、亮度也均与加法混色不同,这也是其命名的根据,因此单独作为混色过程的一类更为合理。

平均法混色又分为空间平均混色和时间平均混色。

在空间上非常靠近的色点,当其对人眼的张角小于1°并离开人眼有一定距离时,人眼就无法分辨这些色点,它们在视网膜上成像的细节比感光细胞的细微结构还小,此时在视网膜上会发生色光混合,这就是空间平均混色。电视荧光屏可以产生各种颜色就是根据此原理,一般选用红、绿、蓝三色荧光粉来复现各种颜色。

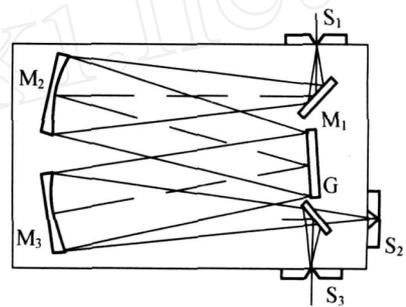
当不同颜色的闪光快速相继刺激视网膜的同一部位时,也会发生平均法混色过程,比如麦克斯韦圆盘实验中,快速旋转表面有不同颜色区域的圆盘,则可以看到混色现象,这种混色过程也叫时间平均混色。

平均法混色得到的色光能量、亮度在感知过

程中是空间或时间的平均,这也是同加法混色的一大区别。

## 3 实验装置

实验中所用的光谱仪为WGD-3型组合式多功能光栅光谱仪,其主要由光栅单色仪、接收单元、扫描系统、电子放大器、A/D采集单元、计算机等部分组成。该光谱仪的光学系统采用C-T型结构,图1为其光学系统的原理示意图。入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝,宽度范围0~2.5mm连续可调;光源发出的光束进入入射狭缝 $S_1$ , $S_1$ 位于反射式准光镜 $M_2$ 的焦面上,通过 $S_1$ 射入的光束经 $M_2$ 反射成平行光束投向平面光栅 $G$ 上;衍射后的平行光束,经物镜 $M_3$ 成像在 $S_2$ 上或 $S_3$ 上。



$M_1$ . 反射镜  $M_2$ . 准光镜  $M_3$ . 物镜  $G$ . 平面衍射光栅  $S_1$ . 入射狭缝  $S_2$ . 光电倍增管接收窗口  $S_3$ . 观察口

图1 C-T型光栅光谱仪的光学系统示意图

## 4 实验结果与分析

### 4.1 加法混色基色和减法混色基色透射光的透射率曲线测定

在样品池(光路)中不放入任何样品(如滤色片),首先测量系统的背景基线。然后,将加法基色滤色片(3片:红、绿、蓝)和减法基色滤色片(3片:青、洋红、黄)分别放入样品池中,使入射光垂直透过滤色片,分别测量上述6个滤色片的透射率曲线(如图2和3所示)。将实验结果与理论曲线相比较,发现实验结果与参考文献上的报道是基本一致的。由于滤色片颜色不是饱和的,不能吸收所有非波峰处的光,所以在非波峰处无法达到零值。另外由于设备的关系,数据在靠近波长700nm一侧不是很准确。

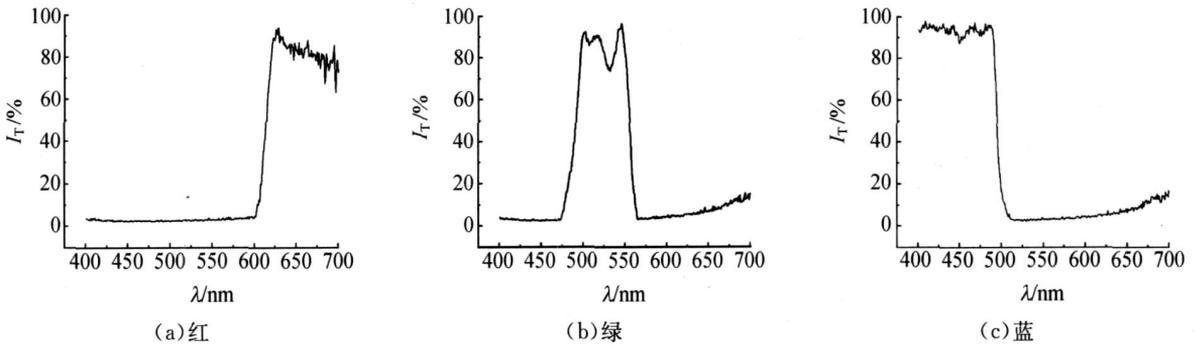


图 2 加法基色滤波片的透射率曲线

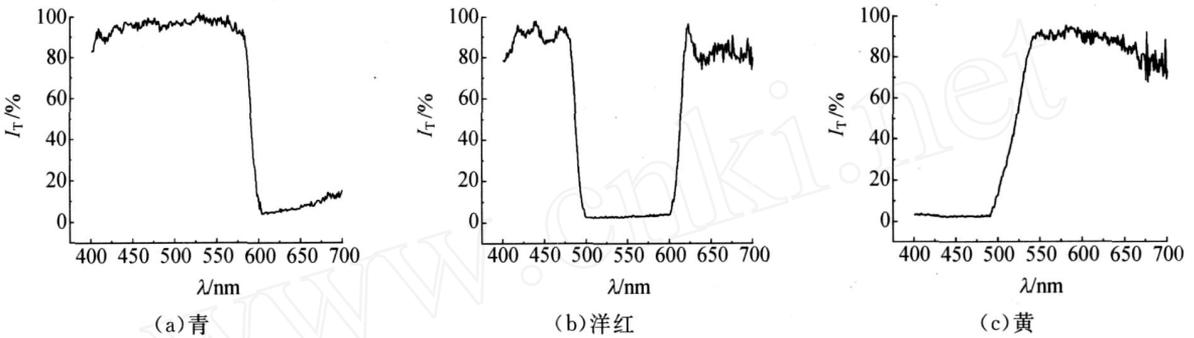


图 3 减法基色滤波片的透射率曲线

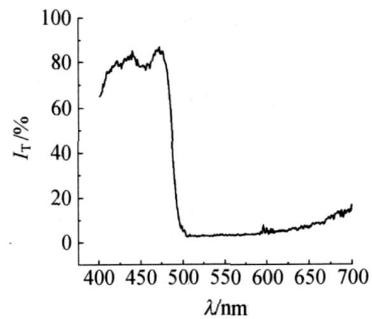
#### 4.2 减法混色滤波片透射光的透射率曲线测定

将上述的减法基色滤波片(3片)两两放入样品池中,使入射光垂直且先后透过所述的2个滤波片,则可以分别测量各种情况的透射率曲线(如图4~6所示),并与加法基色滤波片的透射率曲线相比较。

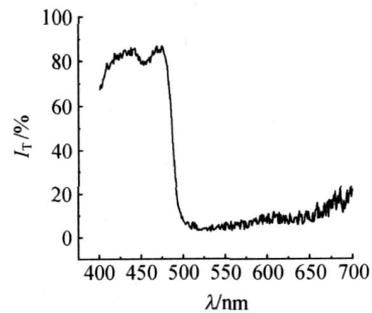
当白光透过青色滤波片+洋红滤波片,理论上应得到蓝色光。图4(a)所示的实验结果表明:可以看出透过光的波长基本处于小于500 nm的范围内,即为蓝色光区域,但波峰处的波形与透过上述单个蓝色滤波片所得到的透射曲线的波形仍有一定的差异[见图2(c)图所示]。

当改变白光透过洋红色滤波片和青色滤波片的先后次序时,即先透过洋红色滤波片,然后才透过青色滤波片,可以发现:其透射曲线[见图4(b)]的波形与图4(a)所示的波形相同。这一实验结果表明:色光透过滤波片的先后次序对减法混色的结果没有任何影响。

同样的实验方法可以分别得到以下透射曲线。图5(a)为通过青色滤波片+黄色滤波片时,



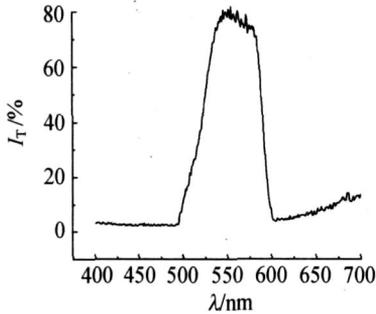
(a) 青+洋红



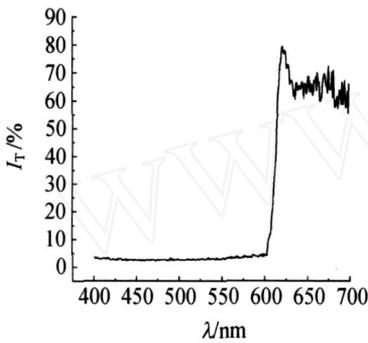
(b) 洋红+青

图 4 减法混色滤波片(青+洋红)的透射率曲线

发现:其透过光主要为绿光,且波峰的位置与绿光波峰位置基本相同[见图 2(b)]. 图 5(b)为通过洋红色滤波片 + 黄色滤波片时,发现:透过光主要为红光,且波峰位置与红光波峰位置基本相同[见图 2(a)].



(a)青 + 黄



(b)洋红 + 黄

图 5 减法混色滤波片的透射率曲线

图 6 为通过洋红色滤波片 + 红色滤波片时,发现:其透过光主要为红光. 与此同时,所观察到的实验现象也表明:加法混色的基色也可以参与到减法混色过程中. 但是,判断该混色过程到底是加法混色还是减法混色其关键点为:在于区分出该混色过程是同时发生还是发生有先后次序,且与参与混色的颜色是无关的.

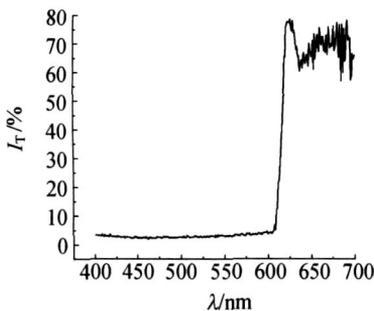


图 6 混色滤波片(洋红 + 红)的透射率曲线

### 4.3 透射光波长与滤波片倾斜角度的关系测定

实验中分别用游标卡尺测量滤波片的直径以及光谱仪样品池内部的深度;将滤波片(如蓝色)斜靠在内壁上,使入射光以一定的倾斜角透射过该滤波片. 然后,再用游标卡尺测量滤波片靠在样品池内壁的上端与样品池顶部的距离,最后利用三角函数关系式,即可以确切地得到光束的入射角大小.

通过改变蓝色滤波片与入射光束之间的夹角,可以分别测量不同入射角度的滤色片的透射率曲线(如图 7 所示). 当逐渐改变入射角由 0 到约 47° 时,在图 7 中的曲线(从右到左),分别对应着 15 个不同的入射角度数据,亦即  $\cos \alpha$  的数值从 1 逐渐减小到约 0.689 6. 该实验的结果直观地表明:滤色片的截止波长是与滤色片的倾斜角度有关,亦即随着入射角的增大,其透射光的波长会发生部分的蓝移,同时透射光的颜色也发生了相应的变化,并且其移动的距离与入射角成正比(如图 8 所示).

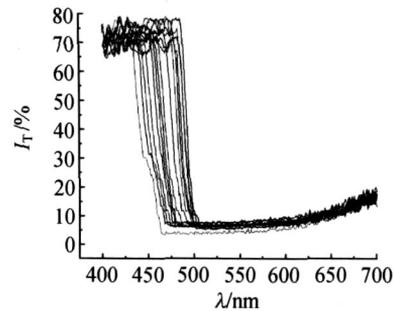


图 7 不同入射角度的滤色片的透射率曲线

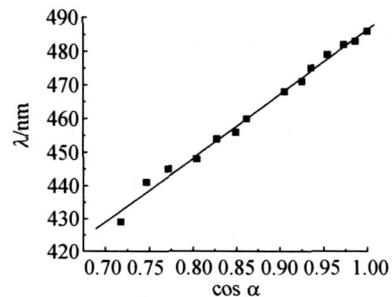


图 8 截止波长与不同入射角度的余弦关系

当研究上述每组数据中靠近波谷的第一个波峰对应的波长值与入射角的定量关系时,通过拟合(见图 8 中的实线所示)可以发现它们之间的数学关系式可以表示为:

$$= 294.94 + 191.46 \cos \alpha,$$

且其相关系数为  $r=0.99576$ 。这表明:该波长值是与每组色光入射角的余弦值存在着线性关系。另外,由于上述所得式子中的斜率为大于零的数值,即 191.46,说明:二者满足正相关的线性关系。

同理,当通过改变其他 5 个滤波片(红色、绿

色、青色、洋红色、黄色)的入射角大小时,即将入射角余弦值分别取了 1, 0.95, 0.85 时,发现:随着入射光束的入射角的改变,其透射光的截止波长也均向短波方向移动(蓝移),但是它们之间的不同点仅在于移动的数值大小不同而异,如图 9 (a) ~ (e) 所示。

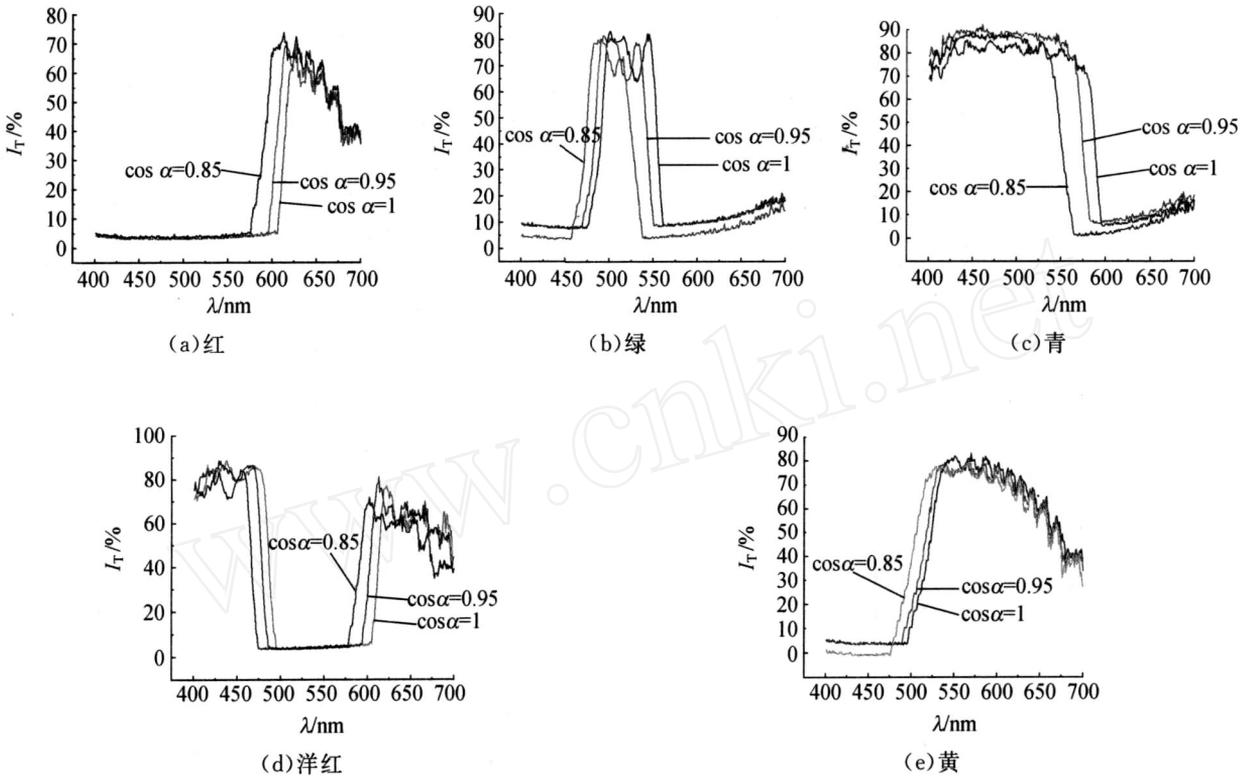


图 9 5 种滤色片的透射率曲线(入射角度不同)

## 5 结束语

用普通的光栅光谱仪对混色的物理现象进行了初步的实验研究,分别测量了 3 个加法基色和 3 个减法基色的光谱,实现了减法混色实验过程。在此基础上,通过实验发现且验证了色光波长会随着入射角增大而发生蓝移的现象。在入射角的数值测量方面,尽管受到测量器材的部分限制,导致实验数据存在一定的误差(不够精确),但是,还是比较清楚地说明了混色物理问题。

## 参考文献:

[1] Gilbert P U P A, Haeberli W. Experiments on sub-

tractive color mixing with a spectrophotometer [J].

Am. J. Phys., 2007, 75 (4): 313-319.

[2] 何国兴. 颜色科学[M]. 上海:东华大学出版社, 2004.

[3] 李亨. 颜色技术原理及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1994.

[4] 王书颖, 平澄. 色度学实验[J]. 物理实验, 1999, 19 (3): 10-12.

[5] 薛朝华. 颜色科学与计算机测色配色实用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.

[6] 陈艳山, 鲍烈. 对三基色纸板反射光色度的分析[J]. 物理实验, 2007, 27 (7): 3-5.

(下转第 46 页)

- [3] 何启浩. 照相胶片的非线性对全息图透射率的影响 [J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 2000, 26(1): 27-31.
- [4] 游明俊. 信息光学基础实验 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [5] 王蕴珊, 王季中. 非线性记录的全息术倍增应力条纹 [J]. 光电子·激光, 1992, 3(5): 278-280.

## Influence of nonlinear conditions on producing multiple holograph

WANG Shou-yu, PAN Ze-yu, LIU Ting, YANG Qing

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Through computing and comparing the light intensity and phase of diffractive images of multiple holographs, the relationships between image qualities and shooting conditions are analyzed. The suitable conditions for producing multiple holograph of high quality are put forward.

**Key words:** holography; nonlinear condition; multiple holograph; diffractive images

[责任编辑:郭 伟]

(上接第 37 页)

## Realization of improved Chua's chaos circuit

CHEN Li-hong<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, GAO Long<sup>1</sup>, AN Xue-jing<sup>2</sup>, ZHOU Xu<sup>1</sup>, LIU Shu-hu<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Liaoning Technological College of Machinery and Electricity, Dandong 118002, China)

**Abstract:** The Chua's circuit is improved, which is also simulated using the Multisim software. The experimental system is constructed, and the phase reconstruction method is used to identify the character of the system. By changing the parameters of the system, various kinds of attractors which show 1p, 2p, 4p and chaotic oscillations are obtained

**Key words:** Chua's circuit; equivalent inductance; chaos attractor; chaos phenomenon

[责任编辑:郭 伟]

(上接第 42 页)

## Experiment on color mixing with spectrometer

CHEN Si, MA Shi-hong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The spectra of additive tricolor and subtractive tricolor are measured using a spectrometer. The process of subtractive color mixing is achieved with combinations of any two of six tricolor filters. Especially, it is found that color lights wavelength will shift towards short-wavelength along with increasing incident angle of light beam.

**Key words:** grating spectrometer; subtractive color mixing; tricolor; wavelength shift

[责任编辑:郭 伟]