文章编号：1005-4642(2022)03-0032-07

综合研究性实验试题 A：三基色 LED 和硅光电池的光电特性及色度综合实验

朱　江[a,b]，李　强[a,b]，刘东奇[a,b]，王　槿[a,b]，惠王伟[a,b]，孔勇发[a,b]
（南开大学 a. 物理科学学院；b. 基础物理国家级实验教学示范中心，天津 300071）

摘　要：介绍了第 7 届全国大学生物理实验竞赛综合研究性实验试题 A 的实验原理和试题内容，并给出了参考解答以及竞赛结果分析. 综合研究性实验试题 A 为三基色 LED 和硅光电池的光电特性及色度综合实验，试题分为 2 部分：首先在未知硅光电池开路电压、光照度线性区间和 LED 电流与光功率关系的前提下，利用等效替代的方法研究硅光电池与 LED 的光电特性；其次区别于传统的色度学实验，根据红、绿、蓝 LED 中心波长和光电池的光强响应，调节三色 LED 电流，通过积分球匀光后得到给定的色坐标. 试题考查了学生对物理基础知识的掌握、新知识的提取、实验方案的设计以及数据分析处理等能力，对物理实验综合能力有较高要求.

关键词：硅光电池；三基色 LED；光谱响应；色坐标；等效替代法
中图分类号：O432.3；TM914；TN312.8　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.03.006

发光二极管(LED)环保、节能，被广泛应用于显示屏、照明、装饰等生产和日常生活中. 硅光电池利用光电效应将光能转化为电能，半导体光敏传感器在数码摄像、光通信、航天器、太阳能电池等领域被广泛应用，在现代科技发展中起到了重要作用. 色度学涉及物理光学、生理、心理等诸多学科，与生产、生活联系紧密，如电脑显示器的颜色显示，绘画、印染的配色等[1-5].

第 7 届全国大学生物理实验竞赛(教学赛)综合研究性实验试题 A 为“三基色 LED 和硅光电池的光电特性及色度综合实验”，试题首先研究了硅光电池和 LED 的光电特性，其次区别于传统的色度学实验，根据红、绿、蓝 LED 中心波长和光电池的光强响应，调节三色 LED 电流，通过积分球匀光后得到给定的色坐标[6-7].

1　原理背景

1.1　硅光电池的光谱响应

光谱响应是光电探测器对单色光辐射的响应能力，定义为某个波长的单位入射辐射功率下，光电探测器输出的信号电压或电流. 若测量光电探测器的输出信号为电压，则光谱响应表达式为

$$v_\lambda=\frac{V(\lambda)}{P(\lambda)}, \tag{1}$$

式中，$P(\lambda)$为波长为 λ 时的入射光功率，$V(\lambda)$为输出信号电压[8].

1.2　色坐标

色坐标就是颜色的坐标，在色度图上确定 1 个点，这个点能够精确地表示包括光源发射的光、被物体反射或透射的光以及漫反射和不透明物体表面的颜色.

红、绿、蓝三原色可合成包括单色光在内的所有颜色. 改变三原色光的亮度，用颜色方程 $C=R(R)+G(G)+B(B)$表示，其中(R)，(G)，(B)代表产生混合色的红、绿、蓝三原色的单位量；R，G，B 称为三刺激值，分别为匹配待配色所需要的红、绿、蓝三原色的数量. 用三刺激值分别求出等能量的单色光各自在 RGB 三维空间的坐标. 1931

收稿日期：2021-10-14；**修改日期**：2021-12-07
基金项目：2020 高等学校教学研究项目(No. DJZW202010hb)；国家基础科学人才培养基金项目(No. J1210027)；南开大学物理基地能力提高项目(No. J1103208)；南开大学 2021 年实验课程改革项目(No. 21NKSYSZ03)；教育部基础学科拔尖学生培养试验计划
作者简介：朱　江(1980－)，女，天津人，南开大学物理科学学院实验师，硕士，主要从事基础物理实验教学与管理工作. E-mail：zhujiang@nankai.edu.cn
通讯作者：李　强(1979－)，男，天津人，南开大学物理科学学院实验师，硕士，主要从事基础物理实验教学与管理工作. E-mail：liqiang@naikai.edu.cn

年 CIE 提出了 CIE 标准色度观察者和色品坐标系统[8-10]，并进行了系统转换，由 *RGB* 系统转换到 *XYZ* 系统，得到 CIE 1931xy 色品图，如图 1 所示.

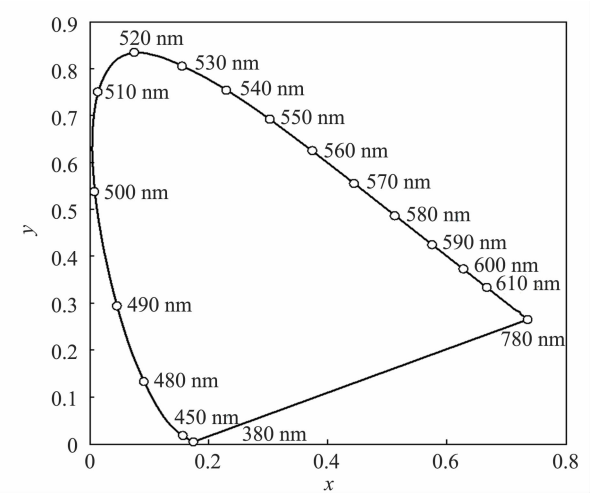


图 1　CIE 1931xy 色品图

CIE 等能光谱三刺激值为 $\bar{x}(\lambda)$，$\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$，如图 2 所示[8-10].

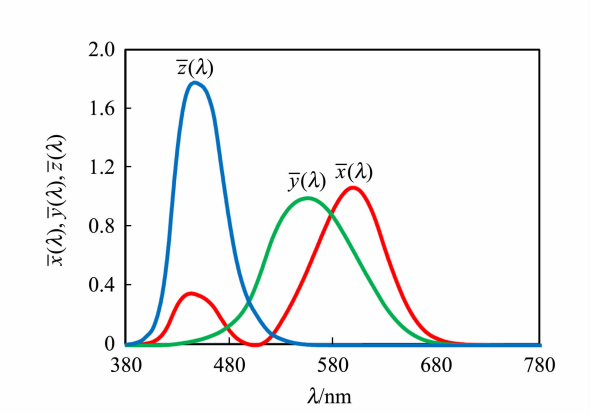


图 2　CIE 1931 标准色度光谱三刺激值曲线

若 1 束光的光谱分布为 $S(\lambda)$，将 $S(\lambda)$ 分别乘以 CIE 等能光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$，$\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 以及波长间隔 $\Delta\lambda$，并在可见光谱范围内求和，得到此束光的三刺激值 X，Y，Z 为

$$\begin{cases} X = k\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Y = k\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Z = k\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda, \end{cases} \tag{2}$$

式中常数 k 为调整因数，是将照明体（或光源）的 Y 值调整为 100 时得到的值，即

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda}, \tag{3}$$

则物体的色度坐标为

$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{X+Y+Z}, \\ y = \dfrac{Y}{X+Y+Z}, \\ z = \dfrac{Z}{X+Y+Z}. \end{cases} \tag{4}$$

由于 $z=1-x-y$，因此色坐标表示为 (x,y)[8-10].

1.3　三基色 LED

红、绿、蓝三色 LED 光谱如图 3 所示.

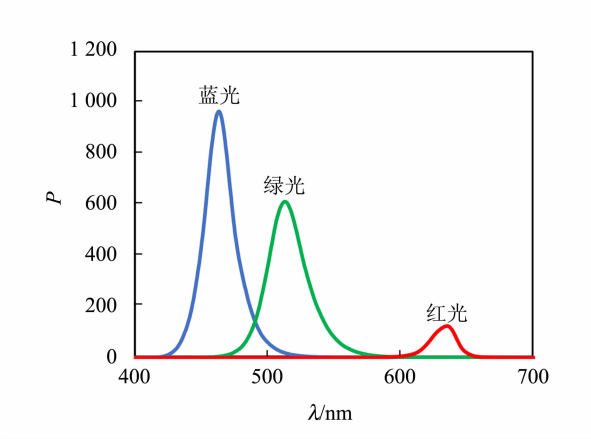


图 3　红、绿、蓝三色 LED 在相同电流下的光谱分布

用硅光电池分别测量红、绿、蓝三色 LED 的光功率时，测得的是 LED 的总光功率，为

$$P = \sum_{\lambda} S(\lambda)\Delta\lambda. \tag{5}$$

为了简化色度计算，将实验中使用的 LED 视为准单色光[11]，定义等效 CIE 等能光谱三刺激值 $\bar{x}$，$\bar{y}$ 和 $\bar{z}$ 为

$$\begin{cases} \bar{x} = \dfrac{\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda}{P}, \\ \bar{y} = \dfrac{\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda}{P}, \\ \bar{z} = \dfrac{\sum_{\lambda} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda}{P}, \end{cases} \tag{6}$$

对于实验中某个单独点亮的 LED 的三刺激值为

$$\begin{cases} X = k\bar{x}P, \\ Y = k\bar{y}P, \\ Z = k\bar{z}P. \end{cases} \tag{7}$$

实验中使用的红、绿、蓝三色 LED 的等效 CIE 等能光谱三刺激值 $\bar{x}$,$\bar{y}$ 和 $\bar{z}$ 详见附录 2.

2 实验器材

a. 红、绿、蓝 LED,其中红光 LED(中心波长 635 nm)3 个,绿光 LED(中心波长 525 nm)1 个,蓝光 LED(中心波长 464 nm)1 个;

b. 电源控制箱 1 台;

c. LED 接头 1 个(可自行更换 LED);

d. 积分球 1 个;

e. 光电池 1 个;

f. 连接线若干.

3 实验任务

3.1 硅光电池和 LED 的光电特性研究

当不同波长的光照射到硅光电池上,硅光电池的响应度(灵敏度)不同,对于不同波长光存在对应的线性响应区间,超出该区间光电池的响应为非线性响应. 因此,首先要通过实验测定光电池的线性响应区间,保证光电池在该区间工作.

电源控制箱配有电压表,正确连接硅光电池和电压表,通过电压表读取硅光电池的开路电压. 参考图 4 搭建光路和电路. LED 接头、硅光电池分别连接到积分球(标签纸为标准限位),如图 4 所示. 电源控制箱可为 LED 供电,并配有电流表,正确连接 LED 及电流表电路,通过电流表读取 LED 电流.

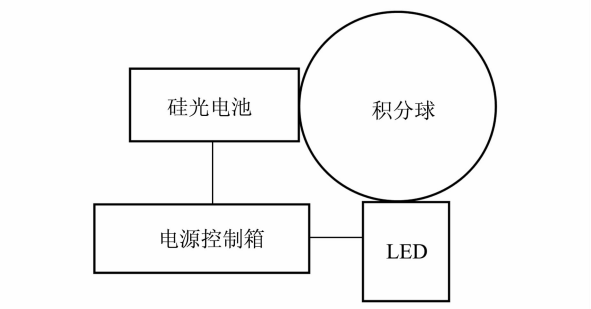


图 4 实验装置示意图

实验要求:

1)请在答题纸上画出点亮 1 个 LED(LED 连接电流表)并用硅光电池测光强时电路的正确连线. (10 分)

2)利用 3 个红光 LED 进行硅光电池开路电压特性测试. 从图 5 可以看到[12],硅光电池的开路电压与光照度的关系是非线性,但当开路电压较小时近似线性. 找到线性度(测量数据与拟合直线间的最大偏差 ΔY_{max} 与满量程输出 Y 的百分比即 $\delta=\frac{\Delta Y_{max}}{Y}\times 100\%$,该值越小,表明线性特性越好)小于 1%的开路电压输出范围(结果精确到 1 mV),在答题纸上写明实验方法和步骤,记录实验数据,并且在坐标纸上画图. 注意:单个 LED 工作范围在 0~20 mA,光功率与电流关系特性未知. (40 分)

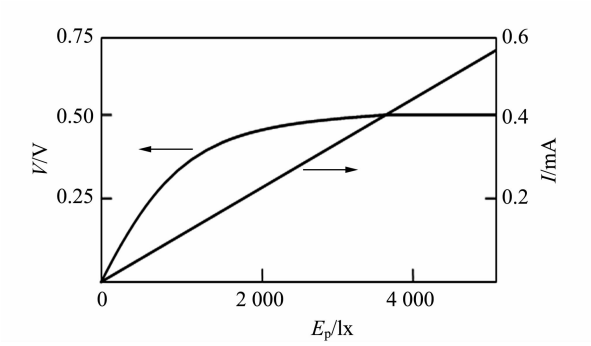


图 5 硅光电池的光照度与开路电压、短路电流的关系

3)在硅光电池的线性工作区,测试红光 LED 电流与光功率的关系(I-P 特性). 在答题纸上记录实验数据,并在坐标纸上画图. (20 分)

3.2 色度学实验研究

同时接入红、绿、蓝三色 LED,正确连接三色 LED 以及电流表电路,同时点亮三色 LED,观察经过积分球匀光后的混合光,并计算混合光的色坐标.

实验要求:

1)分别调节红、绿、蓝三色 LED 电流,使得混合光色坐标为(0.270,0.315)(偏差在±10%以内),请在答题纸上记录此时的红、绿、蓝三色 LED 电流,分别点亮 LED 时硅光电池的电压,并写出色坐标的计算过程. (25 分)

2)请在答题纸的色度图上用"□"画出色坐标(0.270,0.315)偏差±10%以内的范围,用"+"标出实际测得的混合光色坐标. (5 分)

4 试题解答

4.1 硅光电池和 LED 的光电特性研究

1)正确连接电源、LED 和硅光电池,如图 6 所示.

2)首先,将 3 个红光 LED 分别标记为 LED1,

LED2 和 LED3,用 LED1 电流为 1.00 mA 时的光功率作为 1 个单位(学生可根据实际情况自行设定 1 个单位光功率).

其次,记录单独点亮 LED1 时硅光电池的电压值;分别点亮 LED2 和 LED3,调节电流,使硅光电池的电压值与点亮 LED1 时相同. 此时,3 个 LED 发出的光的光功率相同. 同时点亮 2 个 LED,得到 2 个单位的光功率. 同时点亮 3 个 LED,得到 3 个单位的光功率. 测量 1,2,3 个单位光功率时硅光电池的电压,可以发现 1,2,3 是线性的.

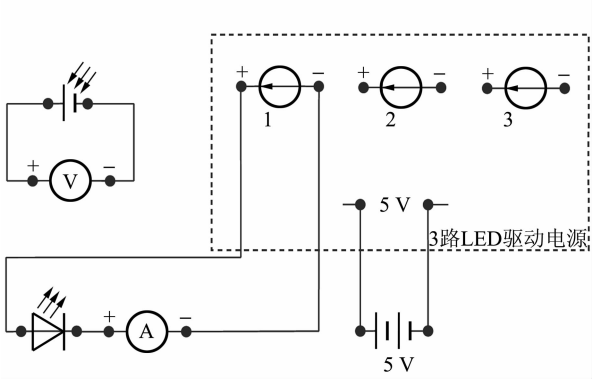
再次,分别单独点亮 3 个 LED,调节每个 LED 电流,使硅光电池的电压均为 2 个单位光功率时的电压读数. 此时,点亮 1,2,3 个 LED,可得到 2,4,6 个单位光功率. 测量 2,4,6 个单位光功率时硅光电池的电压,可以发现 1,2,3,4,6 是线性的.

分别单独点亮 3 个 LED,调节每个 LED 电流,使硅光电池的电压均为 3 个单位光功率时的电压读数. 此时,点亮 1,2,3 个 LED,可得到 3,6,9 个单位光功率. 测量 3,6,9 个单位光功率时硅光电池的电压,可发现 1,2,3,4,6,9 是线性的.

单独点亮 1 个 LED,调节电流,使硅光电池的电压为 3 个单位光功率时的电压读数. 再单独点亮另 1 个 LED,使硅光电池的电压为 2 个单位光功率时的电压读数. 同时点亮这 2 个 LED,可以得到 5 个单位光功率,测量 5 个单位光功率时硅光电池的电压,可以发现 1,2,3,4,5,6,9 是线性的.

用以上方法搭配出更高的光功率,找到硅光电池的开路电压与光照度的线性度小于 1%的开路电压输出范围. 具体实验数据如表 1 所示.

(a)实验装置连线示意图



(b)实验装置线路示意图

图 6　实验装置示意图

表 1　硅光电池开路电压 V 与光功率 P 的数据

P	V/V	P	V/V	P	V/V
1	0.003 8	17	0.065 8	33	0.126 6
2	0.007 6	18	0.069 3	34	0.129 9
3	0.011 6	19	0.074 0	35	0.133 2
4	0.015 5	20	0.078 6	36	0.136 5
5	0.019 5	21	0.081 6	37	0.140 0
6	0.023 4	22	0.084 6	38	0.143 3
7	0.027 3	23	0.089 7	39	0.146 6
8	0.030 9	24	0.093 1	40	0.152 0
9	0.034 7	25	0.096 6	41	0.156 3
10	0.039 4	26	0.100 3	42	0.158 3
11	0.043 1	27	0.104 2	43	0.162 0
12	0.046 4	28	0.107 6	44	0.164 2
13	0.050 8	29	0.111 5	45	0.166 0
14	0.054 6	30	0.115 5	50	0.180 6
15	0.058 7	31	0.120 0	60	0.204 0
16	0.062 2	32	0.122 0		

根据测量结果,开路电压在 0～0.162 V 为硅光电池的线性区域,如图 7 所示.

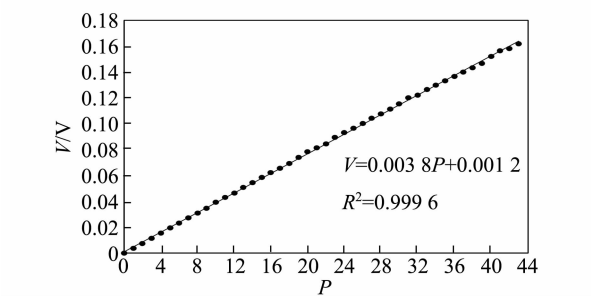


图 7　硅光电池的开路电压与光功率的关系

要求实验数据点不少于 10 个. 为便于赛后阅卷,图 7 中给出了每隔 1 个单位光功率的数据.

3)在硅光电池的线性工作区,照射到硅光电池的光功率与光电池的电压呈线性关系,因此可以用硅光电池的电压表示光功率. LED 的电流与光功率的关系如表 2 和图 8 所示.

表 2 LED 的电流与光功率的关系

I/mA	V/V	I/mA	V/V
0.98	0.004 2	10.98	0.052 2
1.99	0.009 2	11.97	0.056 4
3.06	0.014 7	12.98	0.060 6
4.01	0.019 5	14.02	0.065 0
5.00	0.024 5	15.03	0.069 0
6.05	0.029 5	15.97	0.072 8
6.97	0.033 9	17.02	0.077 0
7.98	0.038 6	18.02	0.080 8
9.01	0.043 4	19.02	0.084 4
10.05	0.048 0	20.06	0.088 3

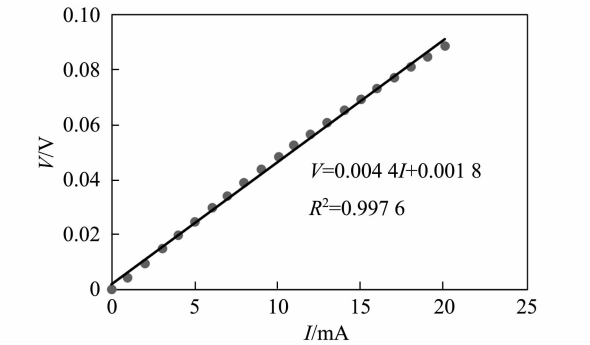


图 8 LED 电流与光功率的关系

4.2 色度学实验研究

1)三色 LED 的电流分别为:$I_R=14.88$ mA,$I_G=1.17$ mA,$I_B=1.48$ mA.

分别点亮三色 LED,硅光电池的电压为:$V_R=0.062\ 0$ V,$V_G=0.020\ 8$ V,$V_B=0.017\ 5$ V.

根据题目附录 1 中提供的硅光电池对实验中所用红、绿、蓝 LED 的响应度,可得到分别点亮三色 LED 时的相对光功率为:$P_R=0.096\ 1$,$P_G=0.104$,$P_B=0.134$.

将本实验中使用的 LED 视为准单色光[11],根据附录 2 的等效 CIE 等能光谱三刺激值 $\bar{x}$,$\bar{y}$ 和 $\bar{z}$,得到同时点亮三色 LED 的混合光的三刺激值为:$X=0.104k$,$Y=0.121k$,$Z=0.158k$,则混合光色坐标为(0.272,0.316).

2)在色坐标图上画出范围,标出测量的色坐标,如图 9 所示.

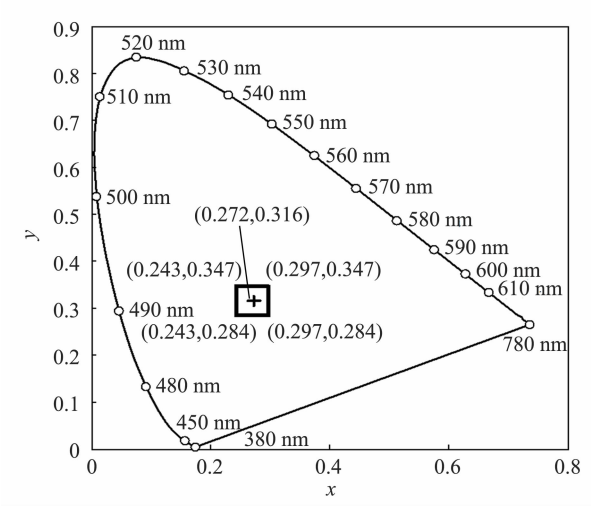


图 9 色坐标图

4.3 试卷附录信息

1)附录 1:硅光电池的光谱响应(常温常压)如表 3 所示.

表 3 硅光电池(型号:QY-2CU33)对实验中使用的红、绿、蓝 LED 的光谱响应(常温常压)

$\lambda_{中心}$/nm	v/V
635	0.645
525	0.200
464	0.131

2)附录 2:将实验用 LED 视为准单色光,等效 CIE 等能光谱三刺激值 $\bar{x}$,$\bar{y}$ 和 $\bar{z}$ 如表 4 所示.

表 4 视为准单色光 LED 的等效 CIE 等能光谱三刺激值

$\lambda_{中心}$/nm	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
464	0.198	0.155	1.037
525	0.209	0.697	0.124
635	0.579	0.287	0.063 8

注:采用天津港东 WGS-8 型色度实验装置分别测量实验中所用红、绿、蓝 LED 色度,根据式(6)计算得到三刺激值.

5 考试结果及评析

5.1 得分分布

综合研究性实验试题 A 总分 100 分,共两部分:第一部分 3 道题,总分 70 分;第二部分 2 道题,总分 30 分. 27 组学生参加了综合研究性实验试题 A 比赛,总分得分情况如图 10 所示,最高分

96 分,最低分 19 分,平均分 37.3 分.

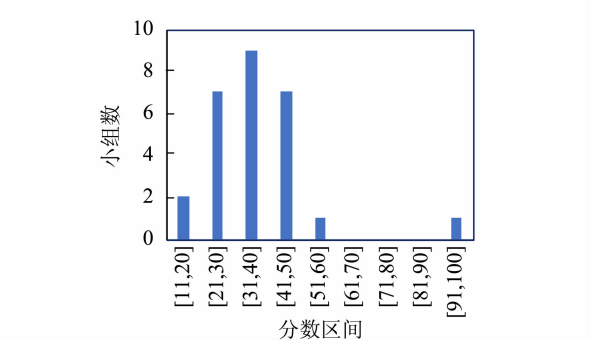
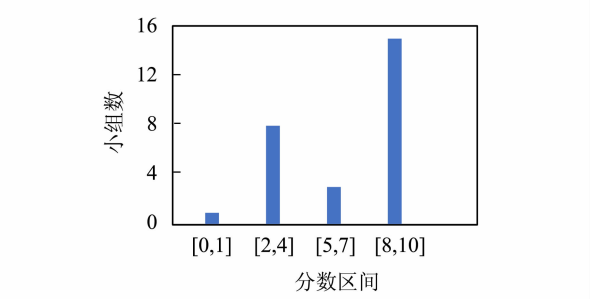
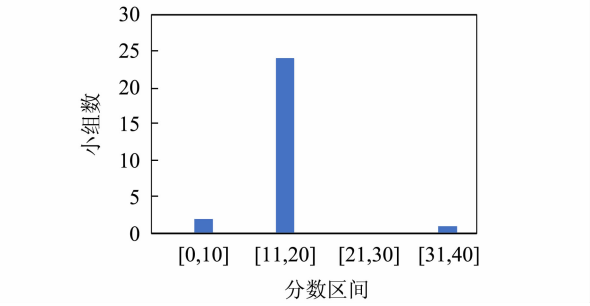


图 10　总分分布

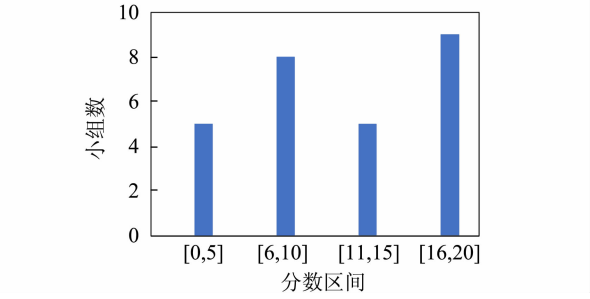
具体题目得分分布如图 11 所示. 第一部分:第一题平均分 7.19 分,得分率较高;第二题平均分 15.6 分;第三题平均分 10.5 分. 第二部分平均分 4.0 分.



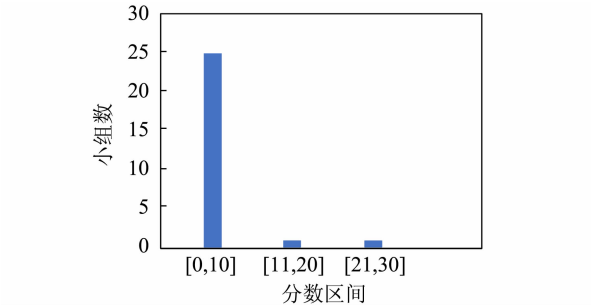
(a)第一部分第一题



(b)第一部分第二题



(c)第一部分第三题



(d)第二部分

图 11　各题目得分情况

5.2　结果分析

综合研究性实验试题 A 的阅读材料共 7 页,背景知识占 4 页. 试卷给出了关于光电池的光谱响应、LED 光谱和色坐标的阅读内容,主要应用于实验任务中. 试题考查了学生对于等效替代法的使用,以及物理基础知识的掌握、新知识的提取、实验方案的设计和数据分析处理等能力,对学生的物理实验综合能力有较高要求.

第一部分第一题考查了 LED、硅光电池、电流表、电压表、电源等的电路连接. 从得分情况和赛场上考生的实际表现情况来看,考生对于基本电路连接的实验水平较高,实验完成度高. 但是,部分考生对电流表、电压表和电源的电路连接仍存在问题. 第二题利用等效替代法寻找光电池开路电压与光照度关系的近似线性区,大部分学生不熟悉等效替代的实验方法,在今后的实验教学中,应加强实验方法和思维的训练. 第三题在硅光电池的线性工作区,测试红光 LED 电流与光功率的关系. 阅卷过程中发现部分学生的数据处理能力不足,作图不规范.

第二部分考查了学生通过调节三色 LED 电流,使得混合光色坐标落在给定坐标点,并在色度图上标出实际测得的混合光色坐标. 绝大多数院校物理类专业及工科专业没有开设色度实验,色度的概念对学生来说比较陌生,学生对于陌生题目的学习能力有待加强.

6　结束语

综合研究性实验试题 A 考查内容较为全面,包括实验步骤、列表和作图法等,对培养学生能力有帮助. 题目难易适中,成绩分布合理,对学生实验思维要求较高. 在大学物理实验的实际教学

中，应注重训练学生科学的实验思维和实验方法，提高学生对新知识的阅读理解以及应变能力，培养规范的作图能力以及数据处理与分析能力.

参考文献：

[1] 陈思，马世红. 普通光谱仪用于混色物理实验[J]. 物理实验，2009，29(6)：38-42，46.

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

[3] 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.

[4] 王亚芳，黄永建，李林，等. 色度实验在地质学的应用[J]. 物理实验，2009，29(11)：35-37.

[5] 吕斯骅，段家忯. 新编基础物理实验[M]. 北京：高等教育出版社，2006：415-423.

[6] 朱江，陈平，刘丽飒，等. 三基色 LED 用于色度学演示实验[J]. 物理实验，2011，31(4)：5-7.

[7] 宋晓亮，苏来曼·艾，朱江，等. 基于 LED 的色度学实验研究[J]. 大学物理实验，2011，24(5)：35-38.

[8] 金伟其，胡威捷. 辐射度 光度与色度及其测量[M]. 北京：北京理工大学出版社，2009：112-149.

[9] 荆其诚，焦书兰，喻柏林，等. 色度学[M]. 北京：科学出版社，1979：272-301.

[10] 腾秀金，邱迦易，曾晓栋. 颜色测量技术[M]. 北京：中国计量出版社，2008：1-3.

[11] Liang K, Li W, Ren H R, et al. Color measurement for RGB white LEDs in solid-state lighting using a BDJ photodetector [J]. Displays, 2009, 30(3): 107-113.

[12] 武汉光驰教育科技股份有限公司. 光电子课程综合实训平台 GCZHKC-A 实验指导书(V2.0)[Z]. 2019：21-30.

Comprehensive test A: Photoelectric characteristics of trichromatic LEDs and silicon photocell and their chromaticity

ZHU Jiang[a,b], LI Qiang[a,b], LIU Dong-qi[a,b],
WANG Jin[a,b], HUI Wang-wei[a,b], KONG Yong-fa[a,b]

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The experiment principle and content, solution and result analysis of the comprehensive test A of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition were given. The comprehensive test A consisted of two parts. Part 1 was about how to study the photoelectric characteristics of silicon photocell and LEDs based on the equivalent substitution method while the linear interval between the open circuit voltage and illuminance of silicon photocell and the relationship between LED current and optical power were unkown. Part 2 obtained the given color coordinates by adjusting the current of trichromatic LEDs and homogenization through integrating sphere according to the central wavelength of red, green and blue LEDs and the light intensity response of photocell, as was different from the traditional colorimetric experiment. The comprehensive test A investigated the students' abilities to use the physical experiment methods and master the basic physical knowledge, as well as the abilities of the extraction of new knowledge, the design of experimental scheme and data analysis and processing. It also put forward higher requirements for the comprehensive ability of physical experiment.

Key words: silicon photocell; trichromatic LEDs; photoelectric characteristics; color coordinates; equivalent substitution method

[责任编辑：任德香]