

文章编号:1005-4642(2023)09-0029-06

## 第 1 届欧洲物理奥林匹克竞赛实验试题的介绍与解答

任雨奇<sup>1,2</sup>, 王 槿<sup>3a,3b</sup>, 宋 峰<sup>3a</sup>

(1. 清华大学 交叉信息研究院, 北京 100084; 2. 长沙市雅礼中学, 湖南 长沙 410007;

3. 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(南开大学), 天津 300071)

**摘 要:**第 1 届欧洲物理奥林匹克竞赛实验试题为发光二极管. 试题利用万用表、热敏电阻和自组的简易压力计等作为测量工具, 设计实验并测量发光二极管的伏安特性、串联寄生电阻、发光效率和光功率极大值. 本文详细介绍了实验试题的命题及其解答, 并简单分析了命题背景和参赛选手的答题情况. 命题基于发光二极管在不同温度下的光电特征, 可作为基础物理实验中发光二极管相关实验的拓展.

**关键词:**欧洲物理奥林匹克竞赛; 发光二极管; 伏安特性

**中图分类号:** O472

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.09.005

欧洲物理奥林匹克竞赛(European physics olympiad, EuPhO)是目前国际上认可度较高的国际性物理学科竞赛之一. 第 1 届 EuPhO 于 2017 年 5 月在爱沙尼亚的塔尔图举办, 来自 20 个国家和地区 的 91 名选手参赛. 该届比赛采用线下实验操作形式, 实验试题为发光二极管(Light-emitting diode, LED)<sup>[1]</sup>. 试题利用万用表热敏电阻和简易压力计测量 LED 的电特性、光特性和热特性, 可作为基础物理实验中发光二极管的拓展实验. 本文主要介绍了实验试题并给出了解答<sup>[2]</sup>, 结合物理背景知识和实际应用分析了命题背景和参赛学生答题情况.

### 1 试 题

#### 1.1 实验介绍

实验装置包括: 2 块相同的电路板(每块电路板上有一个 LED、1 个定值电阻), 1 个热敏电阻, 2 个透明的塑料瓶, 2 个密封盖, 2 根管子, 水, 注射器, 3 台万用表(其中 1 台标注“voltage-only”的万用表只能用来测量电压), 2 个电位器, 电源, 导线, 支架, 带毫米刻度的方格纸. 电路板和电位器的连接如图 1 所示.

绝对温度  $T$  与热敏电阻阻值  $R_T$  的关系为

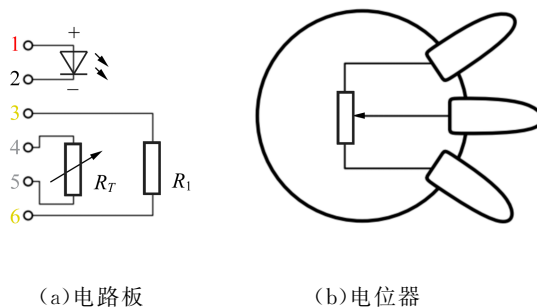


图 1 实验装置示意图<sup>[2]</sup>

$$T = 2.254[\ln(R_T)]^2 - 32.46\ln(R_T) + 361.09, \quad (1)$$

式中,  $T$  的单位为 K,  $R_T$  的单位为  $k\Omega$ .

万用表有二极管模式, 当二极管与“mAV $\Omega$ ”(“+”)和“COM”(“-”)通道相连时, 万用表可以显示二极管两端的电压, 同时提供约 0.33 mA 的电流(可以认为该电流保持不变).

在简化的理论中, 二极管电流  $I_d$ 、LED 内部结点处的电压降  $V$  和结的绝对温度  $T$  满足:

$$I_d = A e^{-V_{G0}/(nV_T)} [e^{V/(nV_T)} - 1], \quad (2)$$

其中, 热电压  $V_T = \frac{k}{q} T$ , 玻尔兹曼常量  $k = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K, 元电荷  $q = 1.602 \times 10^{-19}$  C;  $A$  还取决

收稿日期: 2023-02-10; 修改日期: 2023-05-30

基金项目: 2020 高等学校教学研究项目(No. DJZW202010hb)

作者简介: 任雨奇(2004-), 男, 湖南湘潭人, 清华大学交叉信息研究院 2022 级本科生, 毕业于长沙市雅礼中学. E-mail: 1186279138@qq.com

通信作者: 王 槿(1982-), 女, 湖北十堰人, 南开大学物理科学学院高级实验师, 博士, 研究方向为基础物理实验、仪器仪表及生物医学光子学. E-mail: wangjin8208@nankai.edu.cn

于LED的结构; $n$ 为理想因子,通常 $1 < n < 2$ ;  $V_{G0}$ 为半导体材料的带隙电压,  $V_{G0}$ 和 $n$ 取决于LED的材质.

二极管两端的电压还与串联寄生电阻 $R_s$ 有关,  $V' = V + I_d R_s$ , 其中 $R_s$ 在 $1 \Omega$ 的数量级. 提示: 估算上述表达式的幅值以简化计算.

## 1.2 实验任务

任务1(9分). 测量并画出LED在恒流时电压-温度关系图(电流应该足够小从而使得 $R_s$ 上的电压降可以忽略); 测定 $V_{G0}$ ; 通过额外的测量和合适的作图确定参量 $n$ 和 $A$ ; 当电流增大时, 可测量串联寄生电阻 $R_s$ .

任务2(5分). 定义LED的发光效率 $\eta$ 为辐射出的光能与消耗的电能之比, 在不使用热敏电阻的条件下测量LED的发光效率 $\eta$ .

任务3(6分). LED还可以用作太阳能电池(或光电二极管). 光产生的光电流 $I_p$ 不依赖于电压而是正比于光强; 二极管中的电流应该扣除光电流( $I = I_d - I_p$ ). 来自环境光的光电流足够小, 不会影响之前的测量.

将2个LED相隔 $d = 3.00 \text{ cm}$ 正对放置, 给其中1个LED施加恒定电流 $I_1 = 0.50 \text{ A}$ . 在室温下, 测定LED在此光照设置下能获取的最大电功率 $P_{\max}$ ; 求解对应的光效率 $\eta_p$ (输出电能与在LED有效区域收到的光能之比). 有效区域的面积 $S = 1.56 \text{ mm}^2$ , 假设LED均匀辐射到球面的比率为 $\alpha = 33\%$ .

## 2 试题解答

### 2.1 任务1

使用万用表的二极管模式来测量LED的电压 $V$ . 电路板由电阻 $R_1$ 加热, 用电位器来调节通过 $R_1$ 的电流. 测量数据如表1所示.

通过估算可以发现, 当 $T \approx 300 \text{ K}$ 时,  $V_T \approx 25 \text{ mV}$ , 远小于二极管两端的电压 $V$ . 因此, 对于恒定的电流 $I_d$ , 可以得到:  $\frac{V - V_{G0}}{nV_T} = C$  ( $C$ 为常量), 从而 $V = V_{G0} - BnV_T = V_{G0} - \frac{Bnk}{q}T$ , 其中 $B$ 为常量. 可见 $V$ 与 $T$ 呈线性关系.  $V-T$ 图如图2所示, 由线性回归可得 $V_{G0} \approx 2.073 \text{ V}$ .

接下来使用小电流进行一系列测量, 使二极管基本处于室温. 对式(2)取对数可得:

$$\frac{V - V_{G0}}{V_T} = n \ln I_d - n \ln A. \quad (3)$$

表1 V-T 测量数据

V/V	$R_T/\text{k}\Omega$	T/K	V/V	$R_T/\text{k}\Omega$	T/K
1.560	9.25	300.0	1.560	9.25	300.0
1.555	8.18	302.8	1.555	8.08	303.1
1.550	7.20	305.8	1.550	7.13	306.0
1.545	6.33	308.9	1.545	6.33	308.9
1.540	5.60	311.9	1.540	5.56	312.0
1.535	5.02	314.6	1.535	4.94	315.0
1.530	4.44	317.7	1.530	4.40	317.9
1.525	3.97	320.6	1.525	3.93	320.9
1.520	3.55	323.6	1.520	3.52	323.8
1.515	3.18	326.6	1.515	3.13	327.0
1.510	2.80	330.1	1.510	2.82	329.9
1.505	2.55	332.7	1.505	2.55	332.7
1.500	2.32	335.4	1.500	2.27	336.0
1.495	2.09	338.4	1.495	2.07	338.7
1.490	1.88	341.5	1.490	1.89	341.4
1.485	1.72	344.1	1.485	1.70	344.5
1.480	1.56	347.1	1.480	1.55	347.4
1.475	1.42	350.0	1.475	1.41	350.3
1.470	1.29	353.0	1.470	1.29	353.1
1.465	1.19	355.5	1.465	1.18	355.9
1.460	1.09	358.5	1.460	1.08	358.5
1.455	0.99	361.4	1.455	0.99	361.5
1.450	0.91	364.1	1.450	0.91	364.2

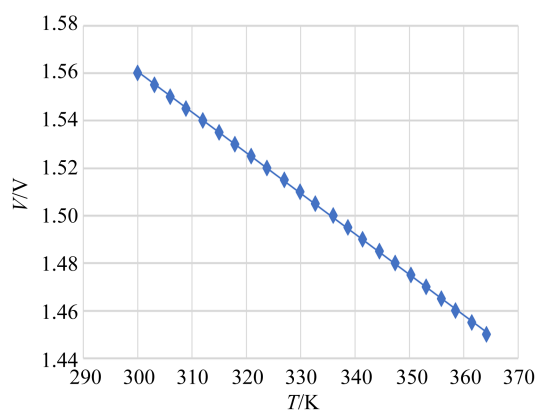


图2 V-T 关系图

因此, 作出 $\ln I_d$ 关于 $V - V_{G0}$ 的关系图即可通过线性回归得到 $n$ 和 $A$ . 也可以在恒定的电压下测量不同温度下的电流. 表达式同式(3). 测量数据如表2所示, 可得到 $\frac{V - V_{G0}}{V_T} \ln I_d$ 关系图, 如图3所示, 进而求得斜率 $n \approx 1.55$ , 截距 $-n \ln A = -7.39$ , 因此 $A \approx e^{7.39/1.55} \text{ A} \approx 119 \text{ A}$ .

表 2  $\frac{V-V_{G0}}{V_T}-\ln I_d$  测量数据

$I/\text{mA}$	$R_T/\text{k}\Omega$	$T/\text{K}$	$\ln(I_d/\text{A})$	$\frac{V-V_{G0}}{V_T}$
33.3	9.76	298.8	-10.310	-22.25
44.8	5.51	312.3	-10.013	-21.29
96.6	7.12	306.1	-9.245	-21.72
150.0	4.72	316.1	-8.805	-21.03
194.1	3.60	313.2	-8.547	-20.57
297.0	2.53	332.9	-8.122	-19.97
417.0	1.84	342.1	-7.782	-19.43
551.0	1.36	351.3	-7.504	-18.92
840.0	1.00	361.0	-7.082	-18.41
860.0	0.95	362.8	-7.059	-18.33

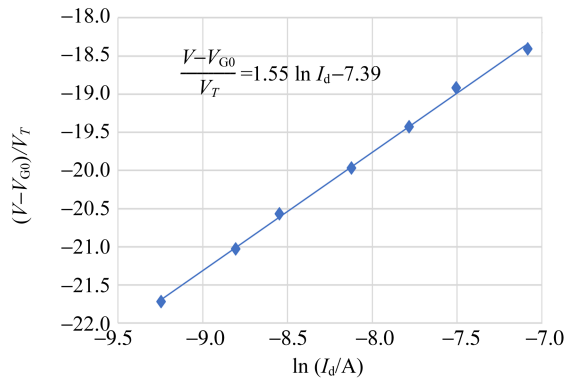


图 3  $\frac{V-V_{G0}}{V_T}-\ln I_d$  关系图

在大电流下,如果用电阻补偿保持温度恒定,电流变化  $\Delta I_d$  会引起二极管结微小的电压变化  $\Delta V$ ,该变化远小于串联寄生电阻的电压变化  $R_s \Delta I_d$ . 因此,在大电流限制下通过测量二极管电流  $I_d$  与总电压  $V' = V + I_d R_s$  的关系得到  $R_s$ ,测量数据如表 3 所示,关系曲线如图 4 所示,进行线性回归可得斜率为  $R_s \approx 0.75 \Omega$ .

表 3  $V'-I_d$  测量数据

$R_T/\text{k}\Omega$	$I_d/\text{A}$	$V'/\text{V}$
0.986	0.850	2.41
1.360	0.750	2.33
1.435	0.700	2.30
6.550	0.189	1.92

另外一种方法是,在大电流下测量电压、温度和电流,根据之前计算的结果反推出串联寄生电阻上的电压. 选取大电流测量的 2 种情况基于测到的电压是 LED 两端电压,二极管结两端电压变化可以忽略.

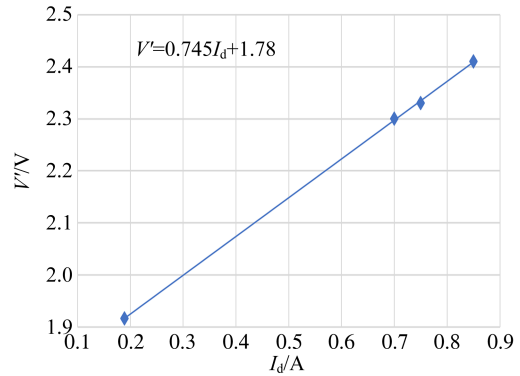


图 4  $V'-I_d$  关系图

### 2.2 任务 2

任务 2 要求在不使用热敏电阻的条件下测量 LED 的发光效率  $\eta$ ,因此需要进行测量对象的转换,搭建实验装置寻找可以测量的物理量. 思路是比较 2 个塑料瓶中空气的热膨胀,其中一个由 LED 加热,另一个由电阻加热. 自组压力计测量压强的差异(瓶内和大气压之间的压差或 2 个瓶内之间的压差). 在 1 根软管中填充水并折成 U 型管,压力差通过 U 型管内水面的高度差显示. 对于电阻,所有的电能以热能的形式释放;对于 LED,一部分能量以光的形式辐射. 塑料瓶中的压强是温度的函数,而瓶内的温度又是由热耗散功率以及热量逸出塑料瓶的速率决定. 后者是瓶中温度的函数. 因此,塑料瓶中的压强是热耗散功率的函数.

通过电位器调节电阻的加热功率,使得 2 个透明塑料瓶中的压强相等,此时 U 型管内水面的高度差为零. 在此状态下,当 LED 的电功率为  $P_D$ 、电阻的电功率为  $P_R$  时,LED 的热耗散功率为  $P_R$ ,光的辐射功率为  $P_D - P_R$ ,LED 的效率为  $\eta = 1 - \frac{P_R}{P_D}$ .

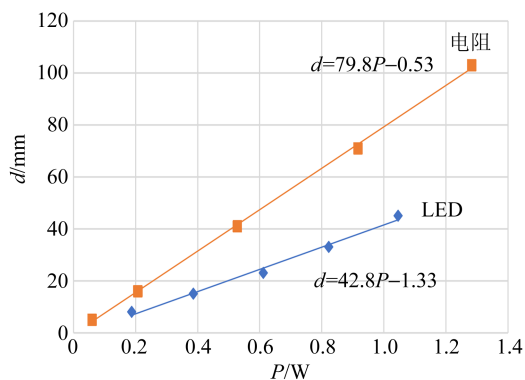
塑料瓶中达到热平衡相对缓慢,大约需要等待 5~10 min. 因此,找到 LED 与电阻热耗散功率相等的状态是相对缓慢的过程. 替代的方法之一是假设与外界交换热量的速率是关于温度线性变化的,然后以瓶内压力作为热耗散功率的函数进行 2 组测量:第一步,LED 通有电流时测量;第二步,电阻通有电流时,  $\Delta p = \Delta p(P)$ . 将数据拟合为线性定律,  $\Delta p = kP$ ,可得相应的系数  $k_D$  (对于 LED) 和  $k_R$  (对于电阻),进而得到 LED 的效率为  $\eta = 1 - \frac{k_D}{k_R}$ .

测量数据如表 4 所示,将表中数据作图拟合.

表 4 求解  $\eta$  测量数据

$I_D/\text{mA}$	$V_D/\text{V}$	$P_D/\text{W}$	$d_D/\text{mm}$	$I_R/\text{mA}$	$V_R/\text{V}$	$P_R/\text{W}$	$d_R/\text{mm}$
101.5	1.85	0.188	8	101.9	0.59	0.060	5
198.2	1.95	0.387	15	190.1	1.09	0.207	16
300.0	2.04	0.612	23	300.0	1.76	0.528	41
390.0	2.11	0.823	33	390.0	2.35	0.917	71
480.0	2.18	1.046	45	470.0	2.73	1.283	103

拟合图像如图 5 所示, 可得:  $k_R = 79.8 \text{ mm/W}$ ,  $k_D = 42.8 \text{ mm/W}$ , 效率  $\eta \approx 0.46$ .

图 5  $d$ - $P$  关系图

### 2.3 任务 3

在该模型下, 虽然光电流不依赖电压, 但二极管电流依赖电压, 故总电流仍依赖于电压. 为找到最大电功率, 需要找到使  $P = VI_p - VI_d$  最大的电压.

该任务有多种方法求解, 一种方法是用电流表短接二极管来测量光电流  $I_p \approx 0.020 \text{ mA}$ , 从而利用模型找到最大电功率  $P_{\max} = 0.026 \text{ mW}$ . 另一种方法是用电位器改变二极管的电压, 测量电流和电压从而找到最大功率. 测量数据如表 5 所示 (其中  $I = I_d - I_p$ ,  $P = VI$ ), 电路如图 6 所示.

表 5  $P$ - $V$  测量数据

$V/\text{V}$	$I/\mu\text{A}$	$P/\mu\text{W}$
0	-15.0	0
0.18	-14.8	2.66
0.40	-14.7	5.88
0.60	-14.6	8.76
0.80	-14.5	11.60
0.99	-14.5	14.36
1.20	-14.2	17.04
1.30	-12.8	16.64
1.35	-11.3	15.26
1.40	-6.0	8.40
1.43	-0.5	0.72
1.46	8.6	-12.56

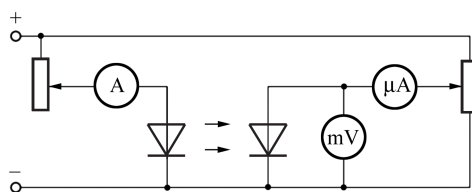
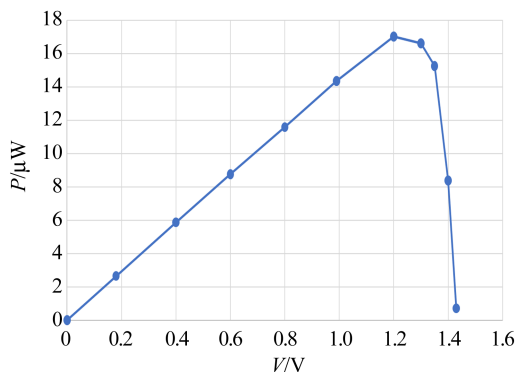


图 6 方法二电路图

表 5 中的数据分布如图 7 所示, 由图 7 可知,  $P_{\max} \approx 17 \mu\text{W}$ . LED 的光效率为

$$\eta_p = \frac{P_{\max}}{P_i} = \frac{P_{\max}}{\eta I_1 V_1 \frac{S}{\alpha 4\pi d^2}}, \quad (4)$$

其中,  $I_1$  和  $V_1$  为另一只 LED 的电流和电压,  $\frac{S}{\alpha 4\pi d^2}$  为到达 LED 有效区域部分的光. 代入数据可得  $\eta_p \approx 0.04$ .

图 7  $P$ - $V$  关系图

## 3 讨论与分析

### 3.1 答题情况

本题满分 20 分, 根据 EuPhO 网站公布的考试结果<sup>[3]</sup>, 本题最高得分 17.9 (来自德国队), 平均得分 5.4. 大部分学生的得分集中在 5 分左右, 最高分断层式领先第二名参赛队伍.

### 3.2 命题背景分析

本题的命题基于发光二极管在不同温度下的

光电特性. 围绕该命题,探究了发光二极管的温度-电压关系、发光效率和光效率,这些可以作为基础物理实验中的发光二极管相关实验的拓展,也可与专业实验结合.

LED由俄罗斯科学家奥列格·洛塞夫于1927年发明<sup>[4]</sup>.在PN结上施加电压时,电子由N侧注入到P侧,空穴由P侧注入到N侧,当满足一定条件时,这些注入的载流子就会在穿越结界时互相湮灭并产生光子<sup>[5]</sup>.

相较于传统灯具,LED使用寿命长、响应时间短、体积小、发光效率高、无有害物质、无频闪、色温宽,已在全世界普及成为主流照明产品.据CSA研究报告,2017年我国半导体照明应用规模达5343亿元,其中2551亿元用于一般照明,占半导体照明市场的47.7%.由于LED的优秀特性,其在通用照明、显示、高速通讯等各个领域都有广泛应用<sup>[6]</sup>.

在大学基础物理实验中,对于LED的光电特性、光谱特性以及热学特性研究都有涉及,试题中的第一部分利用伏安特性进行LED参量测量是较为普通的实验.试题的第二部分体现了较强的实验设计能力,利用塑料瓶和加水的软管自组了简易的压力计,利用软管内液面的高度进行压力读取.类似的实验设计在第3届Gulf Physics Olympiad实验<sup>[7]</sup>和第5届全国大学生物理实验竞赛<sup>[8]</sup>中也有体现,前者利用不同高度的水柱产生压力差,使得液滴悬停并测量水的表面张力系数,后者利用U型计测量毛细管尖端产生气泡的最大气泡压进而求得水的表面张力系数.在实验内容上,该部分综合了热学知识,没有采用功率计,而是将塑料瓶中的压强转换为热耗散功率的函数,灵活运用了物理实验方法.第三部分实验设计也具有一定的创新性,研究了2个LED之间的光电耦合效率,调节参量使阻抗匹配以输出最大功率.

目前国内大多LED实验以验证性实验为主,内容主要包括:绘制光电效应的伏安特性曲线,验证光电流与光强的关系,分析不同光强与频率下的截止电位;验证光电流与光强和频率的关系;验证爱因斯坦方程,确定普朗克常量的实验值.部分高校开展了LED光谱特性研究以及色度学实验<sup>[9-11]</sup>,利用脉冲法或小电流法测量LED结温的热学特性实验<sup>[12]</sup>及利用PN结测量玻尔兹曼常

量的实验<sup>[13]</sup>,物理思想丰富,但目前在基础实验中覆盖面较低.本试题中使用的设备简单,综合了LED的电特性、光特性和热特性测量,特别是第二部分和第三部分,对于LED综合性实验设计和物理知识的融会贯通等都有启示.

## 4 结束语

发光二极管试题采用生活常见物品自主搭建实验架构的设计值得借鉴,这样的设计可以避免实验教学中出现的解答单一化和套路化问题,从而有助于提升学生的实验设计能力.此外,这种设计还能避免因使用过于精密的仪器而缺乏对实验思想的训练.在本题中,实验设计需要进行适当的近似,将待测物理量进行转换,这一思想对于常规教学的实验设计具有启发意义.

## 参考文献:

- [1] European Physics Olympiad [EB/OL]. (2020-06-05)[2023-02-06]. <https://eupho.ee/about/>.
- [2] 1st European Physics Olympiad test expression [EB/OL]. (2017-05-21)[2023-02-06]. [https://eupho.ut.ee/problems/EuPhO17\\_exp.pdf](https://eupho.ut.ee/problems/EuPhO17_exp.pdf).
- [3] 1st European Physics Olympiad result [EB/OL]. (2017-05-25)[2023-02-06]. [https://eupho.ut.ee/problems/1stEuPhO\\_results.pdf](https://eupho.ut.ee/problems/1stEuPhO_results.pdf).
- [4] Losev O V. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals[J]. Philosophical Magazine, 1928,5(39):1024-1044.
- [5] 基泰尔. 固体物理导论[M]. 8版. 项金钟,吴兴惠译. 北京:化学工业出版社,2005:348.
- [6] 林思棋. LED光效及热特性分析研究[D]. 厦门:厦门大学,2018:2.
- [7] Gulf Physics Olympiads [EB/OL]. (2022-05-17)[2023-02-06]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphog/PhO/>.
- [8] 李文华,王瑾,文小青,等. 基础实验题A:液体的表面张力系数测量[J]. 物理实验,2019,39(10):31-36.
- [9] 代如成. 纯色LED的色彩设计与测试实验[J]. 物理实验,2017,37(6):36.
- [10] 朱江,李强,刘东奇,等. 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[J]. 物理实验,2022,42(3):32-38.
- [11] 邹自立. LED综合特性测试教学实验系统的研究与开发[D]. 杭州:浙江工业大学,2013.
- [12] 陈乾,戴玉蓉,孙贵宁,等. LED热学特性研究及

应用实验仪[J]. 物理实验, 2017, 37(7): 39-42.  
[13] 祁玲敏, 韩太坤, 胡素梅, 等. 基于 PN 结的正向伏

安特性测量玻尔兹曼常量的研究[J]. 大学物理, 2019, 38(8): 39-41, 58.

## Introduction and solutions to the experimental question of the 1st European Physics Olympiad experimental exam

REN Yuqi<sup>1,2</sup>, WANG Jin<sup>3a,3b</sup>, SONG Feng<sup>3a</sup>

(1. Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Yali High School, Changsha 410007, China; 3a. School of Physics;  
3b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Nankai University),  
Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The 1st European Physics Olympiad experimental exam was light-emitting diode. Using multimeter, thermistor and self-organized manometer, the experiment was designed to measure the volt-ampere characteristics, the series resistance, the light efficiency and the maximum electrical power of light-emitting diode. This exam was based on the photoelectric characteristics of light-emitting diodes at different temperatures, and could be used as an extension of the related experiments of light-emitting diodes in basic physics experiment. In this paper, the proposition and solution of experiment were comprehensively introduced, and a simple analysis of the propositional motivation and answers situation of the participated students were fulfilled.

**Key words:** European Physics Olympiad; light-emitting diode; volt-ampere characteristics

[编辑: 郭 伟]

(上接 15 页)

## Differential measurement and analysis of collector current in Frank-Hertz experiment

LI Chaorui

(School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The physics content of Frank-Hertz experiment is substantial, and its phenomena have been widely concerned with experimental facts. There is still a shortage of deep discussion about the mechanism of phenomena. In this paper, using the method on differential measurement of collector current, the phenomena observed by conventional technique could be explained clearly by introducing the energy distribution of current. By measuring the changes in the peak shape of energy distribution at different acceleration potentials, the physical essence of alternating between single and double peaks was analyzed, and then the inherent correlation of routine experimental results with energy distribution patterns was deeply discussed. The differential measurement of collector current was conducive to deeply understanding the experimental principle, and the results elucidated the physics of excitation potential as increase with increasing accelerated voltage.

**Key words:** Frank-Hertz experiment; excitation potential; differential measurement; energy distribution

[编辑: 龙玉梅]