

光电效应实验数据处理方法的应用研究

盛竹源 吕昭月 陈勤妙

(华东理工大学物理学院, 上海 200237)

摘 要 数据处理方法是方法论层面的科学研究素养, 在物理实验教学过程中加强数据处理方法的训练, 有助于学生获取必要的科学研究技能, 充分发挥实验课程在技能训练和价值塑造方面的作用。文章阐述了光电效应测量普朗克常数所用数据处理方法——零点法、切线法和直线拟合法, 并讨论了其在科学研究中的应用, 对加强学生科研素养的培养有重要意义。希冀有抛砖引玉之效, 促进物理实验传统教学内容与科学研究方法的互融渗透和和谐统一, 助力研究型、创新型人才培养。

关键词 光电效应; 零点法; 切线法; 直线拟合法; 科学研究方法

DOI: 10.27024/j.wlygc.2024.02.23.01

INVESTIGATION ON THE APPLICATION OF DATA PROCESSING METHODS IN PHOTOELECTRIC EFFECT EXPERIMENT

SHENG Zhuyuan LYU Zhaoyue CHEN Qinmiao

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract Data processing methodology is one of methodologies on scientific research. The reinforcement of the training of data processing methods is conducive for students to acquire essential scientific research skills during physical experiment studying, simultaneously bringing the skills training and value shaping of the experiment curriculums into full play. The data processing methods in the acquisition of Planck constant via photoelectric effect are expounded, including the zero method, tangent method and linear fitting method. Their applications in scientific research are discussed, beneficial for the cultivation of students' scientific research literacy. The authors anticipate that data processing methodology could attract much more attention to promote the integration of traditional teaching of physics experiments and scientific research methods and boost the cultivation of research-oriented and innovative talents.

Key words photoelectric effect, zero method, tangent method, linear fitting method, scientific research methods

光电效应是光量子论应用最早的著名实例之一, 促进了光电子理论的建立和近代物理学的发展。光电效应实验对于理解光的性质和量子物理的发展起着重要作用, 是大学物理实验中非常重

要的内容。光电效应实验通常包含两部分内容: (1) 光电效应实验规律和影响因素的研究; (2) 普朗克常数的测定。诸多学者和教师从误差分析^[1]、自制或改进仪器设备^[2-3]、更新教学系统^[4]

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-04-06; 出版日期: 2026-03-30

基金项目: 华东理工大学大学生创新训练项目(X202310251265); 2020 年度上海高等学校一流本科课程《有机发光二极管制备和电致发光性能虚拟仿真实验》(沪教委高[2021]5 号)。

通信作者: 吕昭月, lvzhaoyue@ecust.edu.cn; 陈勤妙, 54zhenqimiao@163.com。

引文格式: 盛竹源, 吕昭月, 陈勤妙. 光电效应实验数据处理方法的应用研究[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 223-228.

Cite this article: SHENG Z Y, LYU Z Y, CHEN Q M. Investigation on the application of data processing methods in photoelectric effect experiment[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 223-228. (in Chinese)

等不同角度对光电效应实验进行了研究,也有学者从数据处理^[5]和物理核心素养^[6]方面探讨光电效应实验培养学生科学素养的教学方案和教学模式。这些讨论对培养学生科学实验能力、发现和解决问题的能力、严谨的科学态度、数据处理技能等基本科学素养有着积极的作用。然而,目前的研究在实验教学与专业学习及科学研究的相互融合和渗透方面尚有欠缺。

物理实验是学科专业实验和科学研究的基础,相关研究方法也是通用的科学研究方法,物理实验教学过程加强科学研究方法的训练,有助学生获取必要的科学研究技能,充分发挥实验课程在技能训练、价值塑造等方面的作用。本文通过剖析光电效应实验数据处理方法(获得截止电压的零点法和切线法,计算普朗克常数的直线拟合法),分析和探讨其在科学研究中的应用,加强实验教学与科学研究的融合渗透,培养学生研究素养。

1 光电效应实验

1.1 实验原理

爱因斯坦光电效应方程

$$h\nu - W_0 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \quad (1)$$

式中, h 为普朗克常数, ν 为入射光的频率, W_0 为逸出功, $\frac{1}{2}mv_{\max}^2$ 为出射光电子的最大初动能。当照射到金属的光子能量 $h\nu$ 大于其逸出功时,产生光电子发射,进而形成光电流。此时,若在光电管两端施加反向电压,光电子将被减速,当反向电压使光电子刚好不能达到阳极时,光电流为零,此电压称为截止电压 U_0 。根据能量守恒定律,有

$$U_0 e = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \quad (2)$$

联合式(1)和(2),得

$$U_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e} \quad (3)$$

式(3)表明,截止电压 U_0 与入射光的频率 ν 呈线性关系,由斜率 $k = \frac{h}{e}$ 可计算普朗克常数。

1.2 实验仪器

实验采用杭州博源光电科技有限公司生产的光电效应实验仪(BEX-8504系列),包含BEM-

5001恒压源、BEM-5004电流放大器、BEM-5006光电管(带滤色片)、BEM-5007汞灯光源、BEM-5201光学导轨、BEM-5204导轨载架。通过PASCO 550数据采集器,结合计算机软件Capstone收集数据。

1.3 普朗克常数的测量

光电效应实验测量普朗克常数,其关键在于准确获得某一频率 ν (或者波长 λ)下的截止电压 U_0 ,常用零点法和切线法测得。零点法,即反向电压下的伏安特性曲线中,电流 I 等于零时的电压为截止电压。切线法则是在伏安特性曲线中作两条切线,一条是反向饱和电流的切线,另一条是电流指数增加部分的切线,两切线交点对应的电压为截止电压。图1所示是不同波长光照射下,光电管在反向偏压下的伏安特性曲线。为清晰可见,以365nm波长光照射下的伏安特性曲线为例,通过零点法和切线法读取截止电压,如图2所示,分

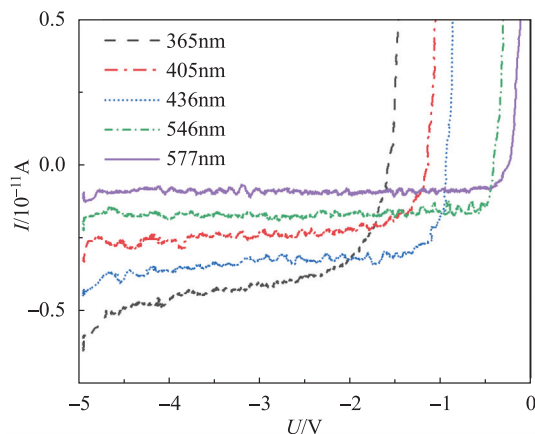


图1 不同波长光照射时,光电管在反向电压下的伏安特性曲线

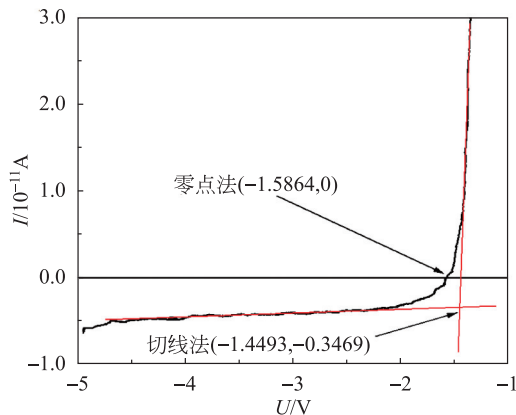


图2 365nm光照射下的伏安特性曲线,零点法和切线法对应的截止电压

别为 -1.5864V 和 -1.4493V 。依次类推,可得其他波长对应的截止电压,列于表 1 中。截止电压与入射光频率的关系如图 3 所示,通过直线拟合,获得普朗克常数,相关参数列于表 2 中。零点法截止电压与入射光频率的关系进行拟合,相关系数 R^2 为 0.9941,相对误差为 2.3%,优于切线法对应的参数,主要原因是切线的选择引起较大的误差。不过两种方法测得的 h 相对误差均在 5% 以内,合理。除了前面提到作切线导致的误差外,还有仪器本身的系统误差^[1],如(1)阴极的热电子发射及漏电流形成的暗电流;(2)制造光电管时阴极材料溅到阳极材料上,导致反向电流。

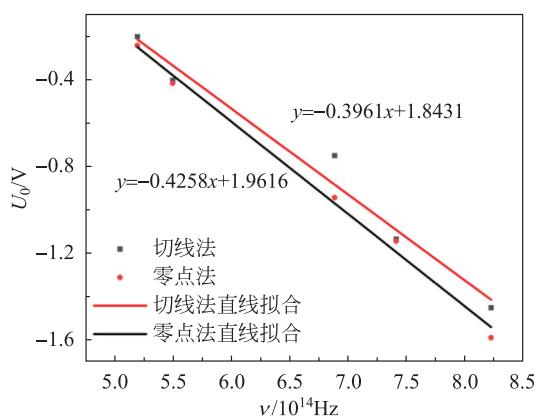


图 3 截止电压与入射光频率的关系

表 1 用零点法与切线法读取的截止电压

λ/nm	365	405	436	546	577
$\nu/10^{14}\text{Hz}$	8.219	7.407	6.881	5.495	5.193
U_0 (零点法)/V	-1.5864	-1.1416	-0.9418	-0.4156	-0.2414
U_0 (切线法)/V	-1.4493	-1.1327	-0.7486	-0.4013	-0.2004

表 2 零点法与切线法获得的普朗克常数

方法	斜率	R^2	$h/(10^{-34}\text{J}\cdot\text{s})$	相对误差/%
零点法	0.423	0.9941	6.78	2.3
切线法	0.396	0.9755	6.35	4.2

2 应用举例

2.1 光电子能谱

光电效应在光电器件和光电测量领域具有广

泛的应用,比如光电倍增管、光电探测器、光电子能谱等。这里着重介绍光电子能谱,即一定能量的光源照射样品材料,材料中电子被激发出来形成光电子,分析光电子的动量、能量、轨道等可实现对材料元素组成、化学位移、价电子轨道、能级排布等性质的研究。根据激发光源把光电子能谱分为 X 射线光电子能谱(XPS)和紫外光电子能谱(UPS)^[7]。典型的光电子能谱图以结合能(binding energy, E_b)或光电子的动能(kinetic energy, E_{kin})为横坐标,光电子相对强度为纵坐标。图 4 所示是使用能量 21.22eV 的 $\text{HeI}\alpha$ 作为激发光源,一种有机材料在电极表面的 UPS 谱图(仪器: Kratos AXIS Ultra DLD 超高真空光电子能谱仪^[8]),图中费米能级已校准到结合能为 0eV 位置处。谱图中高结合能区为二次电子发射区域,低结合能区为价带谱区域;由二次电子截止区/发射边(E_{SECO})可获得样品的功函数 W_0 ;由价带谱区域可获得样品的离化势(ionization potential, IP),相当于价带顶或最高占有轨道(the highest occupied molecular orbital, HOMO)。具体计算公式为

$$W_0 = h\nu_{\text{source}} - E_{\text{SECO}} \quad (4)$$

$$\text{IP} = h\nu_{\text{source}} - \omega = h\nu_{\text{HeI}\alpha} - (E_{\text{SECO}} - \text{HOMO}_{\text{onset}}) \quad (5)$$

其中, $h\nu_{\text{source}}$ 指光源能量,此处为 21.22eV ; ω 代表谱图宽度,即二次发射电子边(E_{SECO})与价带顶起始位置($\text{HOMO}_{\text{onset}}$)之间的宽度。结合吸收光谱获得的禁带宽度或反电子能谱^[7],即可描述材料的整体能带结构。

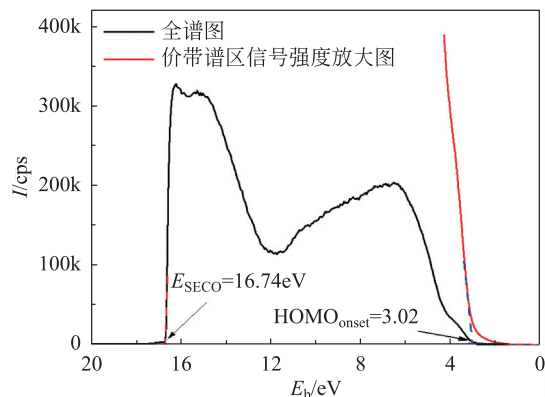


图 4 蒸镀在电极表面的有机薄膜的 UPS 图

cps: counts per second

从谱图中读取 E_{SECO} 和 $\text{HOMO}_{\text{onset}}$ 时,也常

用零点法^[7-8]和切线法^[9],零点法即光电子相对强度由零跃变为正时对应的结合能,若跃变点不明显,可采用切线法。图4所示采用切线法,相应 $E_{\text{SECO}} = 16.74\text{eV}$, $\text{HOMO}_{\text{onset}} = 3.02\text{eV}$ 。根据式(4)和(5)可得,该材料功函数 $W_0 = 4.48\text{eV}$,而 $\text{IP}(\text{HOMO}) = 7.50\text{eV}$ 。

2.2 吸收光谱和发射光谱

UPS能谱可获得材料价带能级,紫外-可见吸收光谱(文中简称“吸收光谱”)可获得材料光学带隙(E_g),二者结合便可导出导带能级,从而了解材料的整体能带结构。吸收光谱是电子在能级间跃迁引起的,吸收谱带直接反映了材料内部能级分布情况,根据吸收带边波长(λ_g)可计算出材料的光学带隙(E_g)。图5所示是三(2-苯基吡啶)合铱(注:一种有机磷光分子)的吸收光谱(仪器:PerkinElmer Lambda 950 紫外分光光度计^[9]),通过切线法读取其吸收带边波长 $\lambda_g = 516.4\text{nm}$,利用公式 $E_g = 1240/\lambda_g$ 计算得 $E_g = 2.40\text{eV}$,与文献数值 $2.4 \sim 2.6\text{eV}$ ^[10-11]很好地吻合,说明切线法可行、可靠。

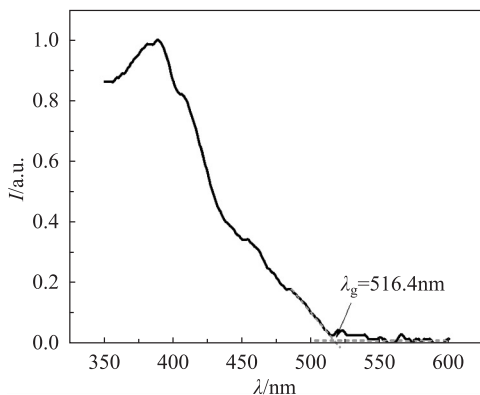


图5 三(2-苯基吡啶)合铱的吸收光谱

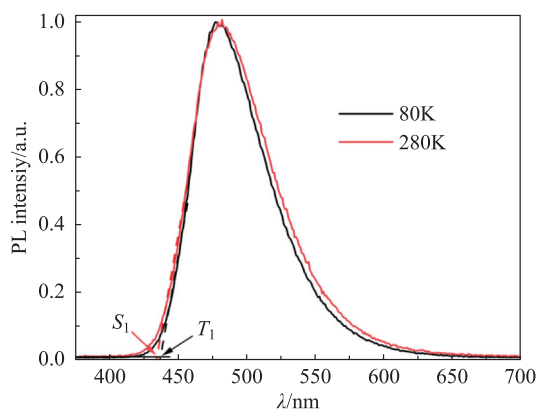


图6 有机分子B的室温荧光发射光谱和低温磷光光谱

分子吸收光能后被激发至激发态,由于激发态是不稳定态,激发态分子中处于高能级的电子将向低能级跃迁,跃迁过程中以各种方式释放能量。若激发态分子以辐射光子的形式跃迁回基态,产生发光,测量其光致发光光谱可对物质结构进行定性和定量分析。根据分子中电子排布结构,用 $2s+1$ 表示分子的多重态, s 为电子自旋量子数的代数。若分子中所有轨道上电子都是自旋配对的,则 $s=0$,分子处于单重态(singlet),用符号S表示;若轨道中具有两个自旋不配对的电子,则 $s=1$,分子处于三重态(triplet),用符号T表示。大多数有机荧光分子的基态为单重态,记为 S_0 ;由于激发过程中可能伴随电子自旋的改变,因此激发态既有S态也有T态,分别记为 S_n 、 T_n (n 为正整数)。根据Kasha规则,辐射发光的激发态一般是最低激发态,即 S_1 和 T_1 。 S_1 到 S_0 的跃迁发光,称为荧光; T_1 到 S_0 的发光,称为磷光,不过 $T_1 \rightarrow S_0$ 是自旋禁阻跃迁,需引入重原子增强自旋轨道耦合才能发生,或者在低温下方可观察到。对常规有机荧光分子,通过其室温荧光发射光谱和低温磷光发射光谱,可获得 S_1 和 T_1 能级值。图6所示是有机分子B的室温荧光光谱和80K下的低温磷光光谱(仪器为Horiba Fluoromax 稳态/瞬态荧光光谱仪,搭载液氮冷却装置^[9]),通过光谱起始边作切线^[9,12],与横轴交点对应的光子能量即为相应的激发态能量。从图6获得该有机分子单重态能量 $S_1 = 2.84\text{eV}$,三重态能量 $T_1 = 2.81\text{eV}$ 。也有文献按类似零点法选择发射光谱起始位置对应的波长计算 S_1 和 T_1 能级值^[13]。

2.3 X射线测普朗克常数

X射线管发射的连续谱最小波长 λ_0 与管电压 U 之间满足杜安-亨特关系,即

$$\frac{hc}{\lambda_0} = eU \Leftrightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{e} \frac{1}{U} \quad (6)$$

式中, h 、 c 、 e 分别为普朗克常数、真空中光速和电子电量。在X射线衍射实验中(仪器厂商:德国莱宝教具公司),以NaCl单晶作衍射晶体,记录不同高压 $U = 24, 26, 28, 30, 32, 34, 35\text{kV}$ 下的X射线连续谱,如图7所示。通过直线拟合可确定各高压对应的最小波长 λ_0 ,相当于连续谱切线与横轴交点对应的波长。以 U^{-1} 为横轴, λ_0 为纵轴作图,通过直线拟合获得斜率 $k = \frac{hc}{e}$,代入真空中光

速 c 与电子电量 e 可得普朗克常数 h 。因为 c 和 e 精度非常高,根据误差传递公式,实验误差主要来自斜率 k 。实验中,电压 U 为设定值,误差可忽略,斜率 k 的误差主要取决于最小波长 λ_0 。同样,切线的选取对 λ_0 值影响较大,通常在近直线区域作切线,以减小误差。对 λ_0-U^{-1} 关系进行直线拟合,如图 8 所示,得 $h=6.5756 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,相对误差 0.77%。

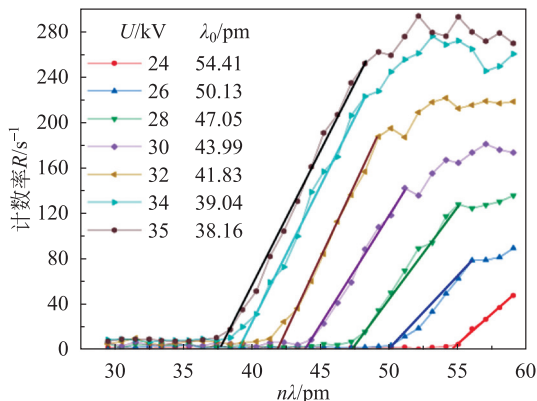


图 7 不同高压下 X 射线经 NaCl 单晶衍射的连续谱

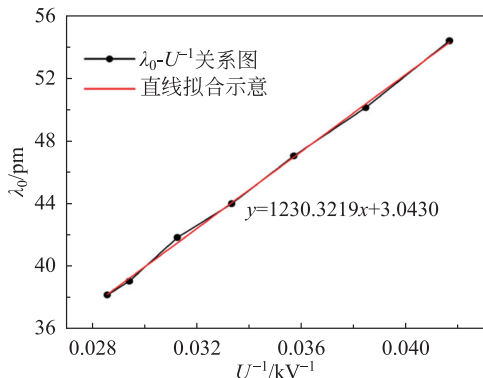


图 8 X 射线实验 λ_0-U^{-1} 关系曲线

作切线和直线拟合,这两种数据处理方法广泛应用于各学科领域的科学研究中,除了上述示例,还有诸如:(1)通过循环伏安法测定有机分子的最高占有轨道,采用切线法读取相应的起始还原电位^[14]。(2)对于函数关系较复杂的情况,常常进行适当转换使自变量与应变变量呈线性函数,再依据实验数据作图进行直线拟合研究相关规律和性能参数。

金属热电子发射的电流密度 j 与热力学温度 T 的规律为里查孙-德西曼 (Richardson-Dushman) 公式

$$j(T) = AT^2 e^{-W/k_B T} \quad (7)$$

式中, A 为常数, W 为金属功函数, k_B 为玻耳兹曼常数。为使电流密度与温度呈线性关系,需把式(7)变换为

$$\ln \frac{j(T)}{T^2} = -\frac{W}{k_B} \frac{1}{T} + \ln A \quad (8)$$

然后以 $\ln \frac{j}{T^2}$ 为纵坐标、 $\frac{1}{T}$ 为横坐标作图,便可直观地研究金属热电子发射规律,验证里查孙-德西曼公式,并可根据拟合直线的斜率获得金属的功函数^[15]。

物理化学中的速率常数 k 与温度 T 的关系常用阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 归纳的经验规律描述

$$k = Ce^{-E_a/RT} \quad (9)$$

式中, E_a 为活化能, R 为气体常数, C 为常数。对式(9)两边取对数,得

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln C \quad (10)$$

根据式(10)绘制阿伦尼乌斯图很容易了解速率常数与温度的关系,获得相应的活化能^[12]。

3 结语

优选的数据处理方法能帮助研究人员更好地理解和分析数据,提高对研究问题的认识和理解;数据处理方法的有效运用,有助于研究人员发现隐藏在数据中的规律和机制,提高研究效率和结论准确性,推动科学研究的发展。本文深入探讨光电效应实验测量普朗克常数所用的数据处理方法:零点法、切线法以及直线拟合法,并列举了这些方法在相关科学研究中的应用,抛砖引玉。教学过程中针对学生学科方向嵌入适当的专业学科案例,助力学生掌握研究方法精髓,同时加强了物理实验教学与专业学习的相互融合,提升学生学习兴趣,强化学生研究素养。

参 考 文 献

- [1] 王林香. 光电效应实验的影响因素及误差分析[J]. 物理与工程, 2016, 26(5): 33-36, 45.
WANG L X. Influence factor and error analysis of the photoelectric effect experiment[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(5): 33-36, 45. (in Chinese)
- [2] 陈金贵, 陈剑峰. 利用自制教具探究光电效应的实验规律[J]. 物理教师, 2021, 42(3): 58-60.
CHEN J G, CHEN J F. An experiment to investigate the

- laws governing the photoelectric effect using homemade teaching aids[J]. *Physics Teacher*, 2021, 42(3): 58-60. (in Chinese)
- [3] 高如意. “可视化”光电效应实验方案的设计与研究[J]. *中学物理*, 2023, 41(9): 55-57.
GAO R Y. Design and research of an experimental protocol for the “visualization” of the photoelectric effect[J]. *Middle School Physics*, 2023, 41(9): 55-57. (in Chinese)
- [4] 朱正, 孙晶华, 张杨, 等. 光电效应实验教学系统[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(3): 108-115.
ZHU Z, SUN J H, ZHANG Y, et al. Photoelectric effect experimental teaching system[J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, 36(3): 108-115. (in Chinese)
- [5] 胡素梅, 陈海波, 祁玲敏. Origin 软件在光电效应实验中的应用研究[J]. *大学物理实验*, 2020, 33(1): 100-102.
HU S M, CHEN H B, QI L M. The study of Origin application in photoelectric effect experiment[J]. *Physical Experiment of College*, 2020, 33(1): 100-102. (in Chinese)
- [6] 童有彩, 张安军. 基于物理核心素养的“光电效应”实验教学探索[J]. *物理教师*, 2023, 44(9): 29-33.
TONG Y C, ZHANG A J. Exploration of “photoelectric effect” experiment teaching based on Physics core literacy [J]. *Physics Teachers*, 2023, 44(9): 29-33. (in Chinese)
- [7] 王伟, 杨金彭, LIU X J, 等. 光电效应与光电子能谱分析技术[J]. *物理教学*, 2023, 45(5): 2-7.
WANG W, YANG J P, LIU X J, et al. Photoelectric effect and photoelectron spectroscopy analysis technology [J]. *Physics Teaching*, 2023, 45(5): 2-7. (in Chinese)
- [8] DAI X J, LIU L Y, JI Z, et al. Surface charge transfer doping of graphene using a strong molecular dopant CN6-CP [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34: 107239.
- [9] LYU Z Y, LIU Y, JIN Y C, et al. A symmetrical carbazole/benzonitrile-based high triplet energy bipolar host designed by a para-linkage strategy for efficient blue and green phosphorescent organic light-emitting diodes[J]. *Journal of Luminescence*, 2023, 261: 119933.
- [10] BAO L Y, ZHU J N, SONG W X, et al. New carbazole-based bipolar hosts for efficient green phosphorescent organic light-emitting diodes[J]. *Organic Electronics*, 2020, 83: 105672.
- [11] NIE W Q, JIANG J X, ZHAO Z B, et al. Efficient alternating current electroluminescence of CBP: Ir(ppy)₃ in the tandem devices with ladder barrier layers[J]. *Synthetic Metals*, 2023, 297: 117426.
- [12] NODA H, CHEN X K, NAKANOTANI H, et al. Critical role of intermediate electronic states for spin-flip processes in charge-transfer-type organic molecules with multiple donors and acceptors [J]. *Nature Materials*, 2019, 18(10): 1084-1090.
- [13] HOSOKAI T, MATSUZAKI H, NAKANOTANI H, et al. Evidence and mechanism of efficient thermally activated delayed fluorescence promoted by delocalized excited states[J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1603282.
- [14] 斯丽姆罕·热合麦提, 李佳佳, 阿孜古丽·木尔赛力木, 等. 新型联苯胺基窄带隙共轭聚合物的光学及电化学性能研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(12): 3751-3756.
SLIMHAN · R, LI J J, ARZUGUL · M, et al. Synthesis and properties of novel benzidine-based narrow band gap conjugated polymer from simple monomers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(12): 3751-3756. (in Chinese)
- [15] KAMBLE S A, BHOPALE S R, GHORUI S, et al. Development of Nanocrystalline LaB₆ Electron Emitters Processed Using Arc Thermal Plasma Route[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(8): 2440-2451.