

用于真空弧等离子体放电阴极温度场测量的多光谱高温计

杨宗举¹, 戴景民^{1*}, 杨林², 王振涛¹

1. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 阴极表面温度是真空弧等离子体放电过程中一个重要参数,对真空弧等离子体的形成、电极腐蚀预测、热传导以及离子源的寿命都有重要影响。真空弧离子源的阴极具有目标小,放电过程快等特点,其温度的测量,对于时间分辨率和空间分辨率要求都很高,阴极表面温度的测量技术的欠缺,使得仅靠理论解析获得的结果难以得到验证。并且等离子体放电过程中测量仪器极易受到弧光的影响,如何避免放电过程中等离子体的辐射也是采用辐射法测量阴极表面温度要考虑的问题。这无疑给其温度场的测试研究带来困难。针对脉冲真空弧等离子体开展阴极表面温度测试实验有着重要意义,在分析了真空弧等离子体放电特性以及背景辐射特性和等离子体放电阴极测温的实际需求,本文基于高速 CCD 相机研制了一种新型的多光谱高温计。该高温计采用单色高速 CCD 相机,主要避免 RGB 彩色相机不能完全滤除背景辐射的弧光。为使用单色 CCD 相机实现多光谱辐射测温,设计了高温计的光学系统,该系统采用 4 孔径分光系统。将 4 种不同波长的滤光片嵌入到 1 个滤光片中。该研究设计的高温计可用于 2 000~6 000 K 的等离子体温度测量。并在中国工程物理研究院电子工程研究所进行现场测试,测试过程中将研制的高温计,通过外部触发形式对等离子体放电过程进行跟踪拍摄,高温计完全拍摄到等离子体放电过程。利用真空弧等离子体金属电极阴极放电的实测数据对高温计进行了验证。实验结果表明,设计的新型多光谱高温计能够用于测量真空弧等离子体放电时阴极温度场信息,测量的温度值低于放电电极的沸点温度,与等离子体放电过程中出现气化现象相符,说明高温计测的是等离子体放电阴极的温度。

关键词 等离子体;金属电极放电;真温;多光谱高温计;高温测量

中图分类号: TK311 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0060-05

引言

真空弧等离子体具有电离度高、产生离子种类多、束流强、纯度好、离子电荷态高等特点,已被广泛用于电弧键膜、离子注入、开关和火箭推进器以及离子源等领域^[1]。金属等离子体阴极在放电过程中会向外辐射能量,可以通过光谱的光强来反映出该等离子体的辐射温度。因此对于快速精确的测量等离子体阴极放电时其阴极场温度具有重要的意义。

对于真温和发射率的测量,多光谱高温计依然是最为主要的测量装置。2005年,Simmons等采用 CCD 相机成像测量了粒子加速器中热离子钨阴极的温度和不均匀性,通过获取 0.4 μm 下的蓝光光谱进行测温,测温精度为 3%^[2]。2011

年,Bergner等根据 CCD 相机测试结果反演出钨阴极的表面温度分布,并采用了 890 nm 的干涉滤光片,在该波长下对 CCD 进行了校准^[3]。2017年,Methling等采用光纤式近红外光谱仪结合高速摄像机测量了 10~20 kA 正弦电流下铜阳极表面温度,并通过校正电极发射光谱获得了电极表面发射率,同时讨论了等离子体辐射对测量带来的影响^[4]。与一般温度场探测不同,真空弧阴极温度场的空间尺度和时间尺度都很小,这给温度场的测试带来很大困难,常规的辐射测温仪无法满足要求。因此,本文研制了基于高速 CCD 相机的真空弧等离子体阴极放电温度场测量多光谱高温计,并对该高温计进行了测试,获取了真空弧等离子体阴极放电的数据,并计算了阴极温度场测的温度值。

收稿日期:2019-12-06,修订日期:2020-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(61875046)资助

作者简介:杨宗举,1989年生,哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院博士研究生 e-mail: yzjhitedu@163.com

* 通讯作者 e-mail: djm@hit.edu.cn

1 测量原理

本文研制的多光谱高温计具有 4 个光谱通道, 采用多光谱测量方法, 用于金属电极放电后阴极场温度测量。

如果多波长高温计有 n 个通道, 则第 i 个通道测得的亮温 T_i 与目标真温 T 的关系为

$$\ln \epsilon(\lambda_i, T) = a + b\lambda_i \quad (1)$$

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_i}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_i, T) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 可得

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_i}{C_2} (a + b\lambda_i) \quad (3)$$

整理得

$$-\frac{C_2}{T_i} = -\frac{C_2}{T} + a\lambda_i + b\lambda_i^2 \quad (4)$$

记 $Y_i = -\frac{C_2}{T_i}$, $b_0 = -\frac{C_2}{T}$, $b_1 = a$, $b_2 = b$, 则式(4)变为

$$Y_i = b_0 + b_1\lambda_i + b_2\lambda_i^2 \quad (5)$$

本文采用的是 4 个光谱通道, 其表达式为

$$\begin{cases} Y_1 = b_0 + b_1\lambda_1 + b_2\lambda_1^2 \\ Y_2 = b_0 + b_1\lambda_2 + b_2\lambda_2^2 \\ Y_3 = b_0 + b_1\lambda_3 + b_2\lambda_3^2 \\ Y_4 = b_0 + b_1\lambda_4 + b_2\lambda_4^2 \end{cases} \quad (6)$$

通过进行拟合计算得出被测目标的真实温度。

2 测量装置设计

高温计主要由高速 CCD 相机和控制计算机系统两部分组成。高温计测量系统原理如图 1 所示。高温计的高速 CCD 相机具体包括成像系统、图像传感以及采集系统。控制计算机系统包括图像处理系统。高温计的成像系统和图像传感及采集系统主要用于将电极辐射能量信号处于高速 CCD 相机的非饱和区域, 并最终得到被测电极目标的数字图像。图像处理系统主要是在计算机系统中运行的, 高速 CCD 相机由一根网线连接至上位机, 通过上位机的软件对图像进行采集及后续处理, 最终得到放电电极的温度(场)信息。

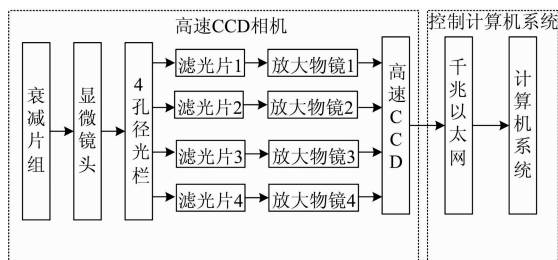


图 1 高温计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pyrometer

本文设计的高温计具有如下性能: 具有较高的时间分辨率和空间分辨率; 滤光片的波长选择要避开等离子体辐射中辐射较强的部分, 保证探测器能获得足够的辐射能量, 提高

仪器的精度和灵敏度。(1)温度场测量时所采用波长数量决定了高温计使用滤光片数量, 滤光片数量增加会增加系统设计的复杂性。本文中采用 4 个波长进行温度测量。根据文献[5], 阴极表面温度的理论计算值均在 2 000 K 以上, 因此探测波段应偏向短波波段, 为了消除弧光的影响, 根据参考文献[1]发现真空弧放电等离子体的发射光谱为线状谱而非连续谱, 通过选择辐射较弱或不存在的波段, 作为阴极温度的探测波段。本文选择 4 个波长分别为: 460, 550, 570 和 640 nm。本文选择的滤光片为 BP 系列滤光片, 其规格直径 6.3 mm×1.1 mm; $\Delta\lambda=20$ nm。(2)高速 CCD 相机选择。采用的高速相机要具有以下性能, 一是相机的响应波段要包含辐射测温所使用的探测波段, 二是相机的时空分辨率要满足要求。根据文献[6], 真空弧阴极温度场区域直径约为 50 μm , 存在时间约为 2 μs , 对高温计进行空间分辨率测试, 测试中目标的宽度为 15.9 mm 在图像里有 512 个像素, 空间分辨率就是单个像素代表的距离, 通过计算其结果为 31.05 μm 。本文采用的高速 CCD 相机最小曝光时间为 293 ns, 因此高速 CCD 相机的时空分辨率满足探测要求。三是高速 CCD 相机在所选波段范围内能有效的探测到阴极目标辐射。

现有彩色 CCD 相机不能完全消除等离子体放电产生的弧光。只能采用单色 CCD 相机, 单色相机只能测到单一波长下的温度值。为解决上述面临的问题, 本文设计了用于等离子体放电阴极温度测量的新型多光谱高温计。将一个滤光片四分波长, 即将 4 种不同波长的滤光片嵌入到 1 个大的滤光片中, 这样单色相机就可以实现四波长下的测温。测量系统采用 4 分孔径分光系统, 即将光路分割成 4 个通道, 通过加装的滤光片实现对光谱的分离, 在 CCD 探测器上实现四幅成像, 实现多光谱测温, 进而得到等离子体放电阴极温度。图 2 是设计的单色多波长高温计的镜头光学原理及结构示意图。

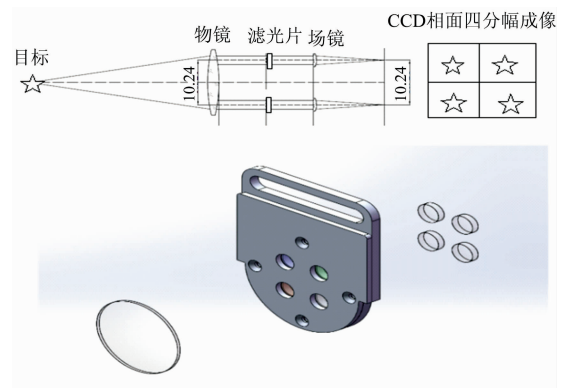


图 2 高温计镜头光学原理及结构示意图

Fig. 2 Diagram of optical principle and structure for pyrometer lens

3 高温计的标定与现场试验

(1) 高温计的标定

为获得真空弧等离子体放电阴极温度, 需要知道多波长高温计每个通道的亮温值和有效波长, 因此需要进行标定,

本文利用滤光片确定了目标各个通道有效波长,不需要对波长进行标定,只需要对温度下目标所辐射的能量进行温度标定。利用最小二乘法对数据进行拟合,以获得最佳拟合结果。本文以第三通道为例,进行数据拟合,拟合的相关系数为 0.998 2。图 3 为研制的高温计第三通道亮温标定曲线图。

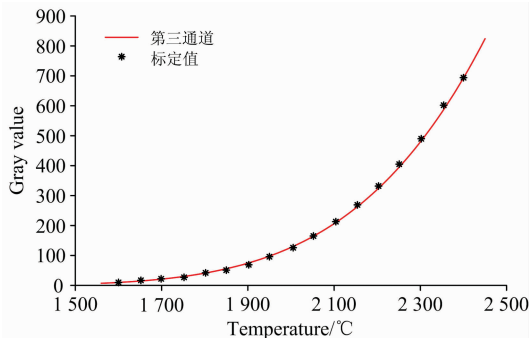


图 3 第三通道亮温标定曲线

Fig. 3 Bright temperature calibration curve of the third channel

(2) 现场实验

为进一步验证设计的多光谱高温计的有效性,在中国工程物理研究院进行验证。应用高温计对等离子体放电阴极的温度场进行测量。放电电流为 880 A,放电电极为铜电极。图 4 为放电开始前对铜电极拍摄的不同波长下 4 幅图像。通过图 4 可以清晰的拍摄到 1 个滤光片下的 4 种波长下的 4 幅成像图,这样就可以通过灰度-温度得到阴极放电电极的温度。图 4(a)为灰度图,图 4(b)伪彩色图。

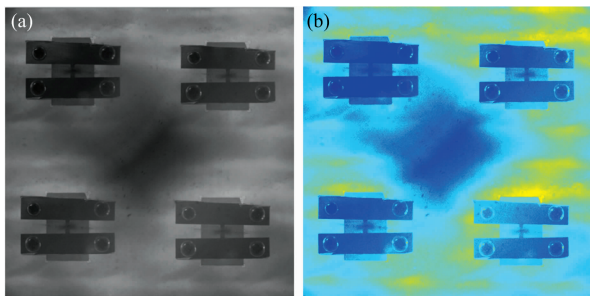


图 4 铜电极的 4 幅成像图

(a): 铜电极的灰度图; (b): 铜电极的伪彩色图

Fig. 4 Four images of copper electrodes

(a): Gray scale image of copper electrode;
(b): Pseudo-color image of copper electrode

本次测量放电电流 880 A 放电过程中铜电极阴极温度场温度。由于放电过程中,高温计部分通道灰度值出现饱和现象,需加入 2% 的衰减片进行温度场测量。图 5 为 t_1-t_9 时刻有衰减片的温度场分布图。

通过图 5 温度分布图可以绘制出同一电流不同放电时刻温度变化图。图 6 为放电电流 880 A 放电过程中不同时刻测量温度变化曲线图。

本文研制的高温计在最小曝光时间 293 ns 下通过外部触发完全能够拍摄到等离子体放电的过程。通过图 6 计算出

对于同一放电电流情况下测量的阴极温度。铜电极沸点温度在 2 567 °C,等离子体在气化过程中阴极温度会降低,所以理论上阴极温度略小于 2 567 °C,等离子体放电温度测量实验中测得的阴极温度峰值为 2 541.51 °C,略低于铜电极沸点,与理论值相符,说明了设计的高温计可以有效测量等离子体放电阴极温度。

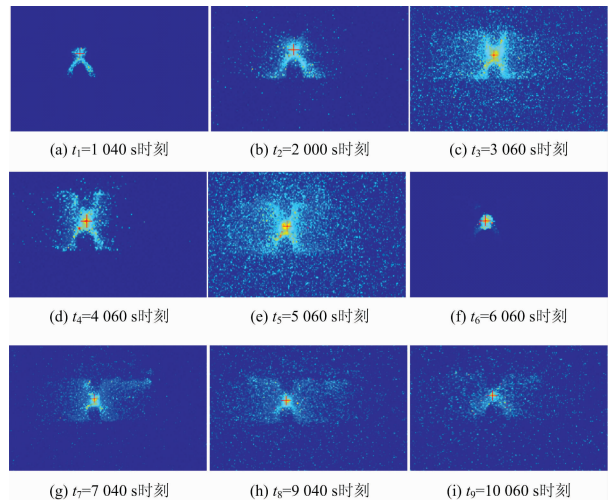


图 5 有衰减片铜电极 t_1-t_9 时刻温度场分布图

Fig. 5 Temperature field distribution of attenuator copper electrode at time t_1-t_9

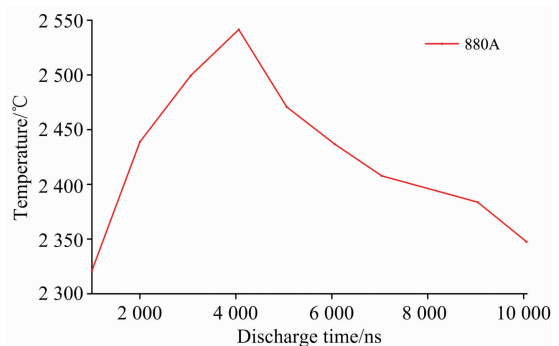


图 6 同一放电电流不同放电时间温度图

Fig. 6 Temperature diagram of different discharge time for the same discharge current

4 不确定度分析

采用的高温计的测量不确定度受多种因素的影响,主要包括四个方面:理论误差的不确定度;CCD 相机在非理想情况下响应波长带宽不确定度;发射率变化不确定度;标定的不确定度。

理论误差不确定度在本次高温测量中,通过使用维恩公式得出系统的理论误差,系统的最大相对误差为 $\epsilon_e = 1.0\%$; CCD 相机在非理想情况下响应波长带宽不确定度为 $\epsilon_a = 0.012\%$;目标发射率变化不确定度根据文献[10],经计算可知发射率变化不确定度为 $\epsilon_b = 0.93\%$;标定的不确定度本文只需要温度标定,因此标定的不确定度就是温度标定的不确定度,根据该高温计的温度标定结果可知,标定的不确定度

为 $\epsilon_c \approx 0.14\%$ 。

由以上不确定度分析可以得到此多波长高温计的真温测量的合成标准不确定度为

$$\epsilon_{\text{Total}} = \sqrt{\epsilon_c^2 + \epsilon_a^2 + \epsilon_b^2 + \epsilon_c^2} \approx 1.37\% \quad (9)$$

通过乘以包含因子 $k=2$ ，得到合成扩展不确定度为 2.74% ，此时置信概率为 95% 。

5 结 论

研制了基于高速 CCD 相机的单色四波长真空弧等离子

体阴极放电温度测量多光谱高温计，其波长范围为 $300\sim 900$ nm。本文对滤光片进行了重新设计，将 4 种不同波长的滤光片嵌入到 1 个滤光片中，实现多光谱测温。通过对等离子体阴极放电温度的现场测量，验证了高温计的工作性能。实验结果表明，所研制的高温计可以测等离子体放电阴极温度。在同一放电电流情况下，阴极的温度随放电时刻的变化先增大后减小，实验值与理论值相符。高温计测量的是等离子体放电阴极温度。高温计的研制成功为真空弧等离子体阴极放电的真实温度测量提供了一种有效的途径。

References

- [1] YANG Lin(杨 林). Doctoral Dissertation(博士论文). Lanzhou University(兰州大学), 2014.
- [2] Simmons D, Fortgang C, Holtkamp D. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(4): 044901.
- [3] Bergner A, Westermeier M, Ruhrmann C, et al. Journal of Physics D—Applied Physics, 2011, 44(50): 505203.
- [4] Methling R, Franke S, Gortschakow S, et al. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2099.
- [5] Nishijima D, Doerner R P, Seraydarian R P, et al. Journal of Nuclear Materials, 2015, 463: 440.
- [6] Hantzsche E. Contributions to Plasma Physics, 1983, 23(1): 77.

A Multi-Spectral Pyrometer for Measuring Cathode Temperature Field of Vacuum Arc Plasma Discharge

YANG Zong-ju¹, DAI Jing-min^{1*}, YANG Lin², WANG Zheng-tao¹

1. School of Instrumental Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract The cathode surface temperature is an important parameter in the vacuum arc plasma discharge process, which has an important influence on the formation of vacuum arc plasma, electrode corrosion prediction, heat conduction and ion source lifetime. The cathode of the vacuum arc ion source has the characteristics of the small target and fast discharge process, and its temperature measurement requires high time resolution and spatial resolution. The lack of measurement techniques for the surface temperature of the cathode makes it difficult to verify the results obtained by theoretical analysis alone. Moreover, the measuring instrument is highly susceptible to arcing during plasma discharge. How to avoid plasma radiation during discharge is also a problem to be considered when measuring the surface temperature of the cathode by radiation. This undoubtedly brings difficulties to the testing of its temperature field. It is important to carry out the cathode surface temperature test experiment for pulsed vacuum arc plasma. In this paper, the vacuum arc plasma discharge characteristics and background radiation characteristics and the practical requirements of plasma discharge cathode temperature measurement are analyzed. A novel multi-spectral pyrometer is developed based on the high-speed CCD camera. In order to realize multi-spectral radiation temperature measurement using a monochrome CCD camera, an optical system of a pyrometer is designed, and the optical system adopts a 4-aperture spectroscopic system. For the first time, four different wavelength filters are embedded in one filter. The pyrometer designed in this paper can be used for plasma temperature measurement from 2 000 to 6 000 K. The field test was carried out at the Institute of Electronic Engineering of China Institute of Physics and Engineering. The pyrometer to be developed during the test was tracked and shot by the external trigger form. The pyrometer completely captured the plasma discharge process. The pyrometer was verified by the measured data of the vacuum arc plasma metal electrode cathode discharge. The experimental results show that the designed multi-spectral pyrometer can be used to measure the cathode temperature field information during vacuum arc plasma discharge. The measured temperature value is lower than the boiling point temperature of the discharge electrode, which is consistent with the gasification phenomenon during plasma discharge. It is stated that the pyrometer measures the temperature of the plasma discharge cathode.

Keywords Plasma; Discharge of metal electrode; True temperature; Multi-spectral pyrometer; High temperature measurement

* Corresponding author

(Received Dec. 6, 2019; accepted Apr. 19, 2020)

《光谱学与光谱分析》投稿简则

《光谱学与光谱分析》是由中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的专业学术期刊。国内外公开发行人,从 2004 年起为月刊,大 16 开本,2020 年仍为月刊,每期 332 页。《光谱学与光谱分析》主要报道我国光谱学与光谱分析领域内具有创新性科研成果,及时反映国内外光谱学与光谱分析的进展和动态;发现并培育人才;推动和促进光谱学与光谱分析的发展。为科教兴国服务。读者对象为从事光谱学与光谱分析的科研人员、教学人员、分析测试人员和科研管理干部。

栏目设置和要求

1. 研究报告 要求具有创新性的研究成果,一般文章以 8000 字(包括图表、参考文献、作者姓名、单位和中文、英文摘要,下同)为宜。

2. 研究简报 要求在前人研究的基础上有重大改进或阶段性研究成果,一般不超过 5000 字。

3. 评述与进展 要求评述国内外本专业的发展前沿和进展动态,一般不超过 10000 字。

4. 新仪器装置 要求介绍新型光谱仪器的研制、开发、使用性能和应用,一般不超过 5000 字。

5. 来稿摘登 要求测试手段及方法有改进并有应用交流价值,一般以 3000~4000 字为宜。

稿件要求

1. 投稿者请经本刊编委(或历届编委)一人或本专业知名专家推荐,并附单位保密审查意见及作者署名顺序,主要作者介绍。文章有重大经济效益或有创新者,请说明,同时注明受国家级基金或国家自然科学基金资助情况。

2. 来稿要观点明确、数据真实可靠、层次分明、言简意明、重点突出。来稿必须是网上在线投稿(含各种符号和外文字母大写、小写、正体、斜体;希腊字母、拉丁字母;上角、下角标位置应标清楚)。中文摘要以 800 字为宜,英文摘要(建议经专业英语翻译机构润色)与中文摘要要对照;另附关键词。要求来稿应达到“齐、清、定”,中文、英文文字通顺,方可接受送审。

3. 为了进一步统一和完善投稿方式、缩短论文发表周期,本刊只接收网上在线投稿,不接收以邮寄方式或 e-mail 方式的投稿,严禁“一稿多投”,对侵权、抄袭、剽窃等学术不端行为,一经发现,取消三年投稿资格。

4. 文中插图要求完整,图中坐标、线条、单位、符号、图注等应标注准确、完整。如作者特殊要求需出彩色插图者,必须在投稿时事先加以说明,并承担另加的彩印费用。图幅大小:单栏图 7.5cm(宽)×6cm(高);双栏图:14cm(宽)×6cm(高);图中数字、图题、表题全部用中文、英文对照,图中数字、中文、英文全用 6 号字。电子文档中除实物图外,曲线图要用 Matlab, Excel, Visio 或 Origin 等软件制作,稿件中图片的原图并转成相应(可编辑)的文件格式(.fig, .xls, .vsd, .opj),非“.jpg”格式的文档,随电子版修改稿一同发送到本刊的修改稿专用邮箱。

5. 文中出现的单位必须按“中华人民共和国计量标准”及有关 GB 标准规定缮写。物理量符号一律用斜体,单位符号和词头用正体字母。

6. 名词术语,请参照全国科学技术名词规定缮写。

7. 参考文献,采用顺序编码制,只列主要文献;以 15~20 条为宜。内部资料、私人通讯、未经公开发表的一律不能引用。日文、俄文等非英文文献,请用英文表述;中文文献和中文图书采用中、英文对照表述,文献缮写格式请参照本刊。

8. 请在投稿第一页左下角写明投稿联系人的电话和两个 e-mail,以便及时联系。

稿件处理

1. 自收到稿件之日起,一个月内作者会收到编辑部的稿件处理意见。请根据录用通知中所提出的要求认真修改,希望修改稿在 30 天内寄回编辑部,并作为作者最终定稿(当作者接到校样时,以此修改稿为准进行校对,请勿再做大的改动),若二个月内编辑部没收到修改稿,将视为自行撤稿处理。

2. 有重大创新并有基金资助者可优先发表;不录用的稿件,编辑部将尽快通知作者,底稿一律不退,请自留底稿。

3. 来稿一经发表将酌致稿酬并送样刊 2 册。

4. 遵照《中华人民共和国著作权法》,投稿作者须明确表示,该文版权(含各种媒体的版权)授权给《光谱学与光谱分析》期刊社。国内外各大文献检索系统摘录本刊刊出的论文;凡不同意被检索刊物无稿酬摘引者,请在投稿时事先声明,否则,本刊一律认为已获作者授权认可。

5. 修改稿请寄:100081 北京市海淀区学院南路 76 号(南院西北门),《光谱学与光谱分析》期刊社(收)

电话:010-62182998 或 62181070 传真:010-62181070

e-mail: chngpxygpfx@vip.sina.com; 修改稿专用邮箱: gp2008@vip.sina.com 网址: http://www.gpxygpfx.com