

## 基于平面螺旋电感的微型 ICP 激发源

王永青<sup>1,2</sup>, 娄建忠<sup>1</sup>, 孙荣霞<sup>1</sup>, 马雯<sup>3</sup>, 唐予军<sup>1</sup>, 蒲永妮<sup>1</sup>

- 1 河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002
- 2 钢铁研究总院, 国家钢铁材料测试中心, 北京 100081
- 3 中国人民武装警察部队学院, 河北 廊坊 065000

**摘要** 随着微电子机械系统(MEMS)技术的发展,基于MEMS的光谱仪分光系统和光电检测系统研究报告日益增多,但是微型激发源的研究报道相对较少。文章介绍了一种基于表面微机械加工技术的微型电感耦合等离子体(ICP)激发源,其RF功耗在数瓦以下、氩气消耗量远低于常规ICP激发源。阐述了这种激发源的结构、加工工艺流程及性能指标。同时还介绍了作者设计制作的基于PCB工艺的微型ICP激发源,采用了平面螺旋电感线圈和平面梳状交指电容,在100 Pa氩气气压下用13.56 MHz, 3.5 W射频功率激励点燃了等离子体火炬,给出了装置的外观微型ICP火炬的照片。最后展望了该微型的ICP激发源在光谱仪中的应用前景。

**关键词** 原子发射光谱; 表面微机械加工技术; 微型ICP激发源; 光谱仪; 平面螺旋电感

中图分类号: TG115.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)11-2708-05

氩气气压下用13.56 MHz, 3.5 W射频功率激励点燃了等离子体火炬。

## 引言

原子发射光谱(AES)仪器是材料领域中最为常用的元素分析仪器。由于它是利用原子发射特征谱线所提供的信息进行元素分析,具有多元素同时、快速、直接测定的优点。因此,在冶金、机械制造、金属加工等工业生产上发挥了巨大的作用<sup>[1]</sup>。目前,在原子发射光谱分析仪器中,应用较多的是ICP作为激发光源的ICP-AES。

ICP-AES具有良好的检出限性能,但整个仪器存在体积大、价格昂贵、安装调试困难、使用条件苛刻等不足,无法满足现场化、实时化分析的要求。因此,便携化、微型化成为光谱仪器的发展趋势之一。近年来,由于MEMS技术、光纤、固态光检测阵列(CCD/CID)及其他相关技术的进步,使得光谱仪器中分光、检测系统的微型化得到长足发展<sup>[2-8]</sup>。而微型激发源的研究报道相对较少,仅有美国东北大学关于微型激发源的研究报道<sup>[9-16]</sup>。目前普遍使用的一个大气压工作的ICP发生器射频功率在千瓦量级、氩气消耗量在14 L·min<sup>-1</sup>左右<sup>[7]</sup>。本文介绍的微型ICP激发源是一种低压、低功耗的新型激发源,与常压ICP激发源相比,其射频功率、氩气消耗量、体积、重量均会极大的减小,且制造成本低、便于批量生产。介绍了作者设计的基于PCB镀金工艺的微型ICP激发源,并在此基础上进行了启燃实验,在100 Pa

## 1 微型 ICP 激发源

### 1.1 早期的研究<sup>[9]</sup>

最初制作的微型ICP激发源的结构与常规ICP激发源相同,仍采用三维螺旋线圈作为感应线圈。这种微型ICP激发源是在6 mm的硼硅酸耐热玻璃管上线绕一个20匝的线圈,线圈与13.56 MHz, 3 W的射频功率源相连接,等离子体在管内直径为4 mm的区域中产生。采用这种结构的微型激发源效率很低,大部分功率在线圈中消耗掉了,只有一小部分被等离子体吸收,而且这种三维结构与微机械加工技术不兼容,使得微型ICP激发源集成化程度较低。为了提高微型ICP激发源的效率并实现单片集成化,就必须对它的结构、工作参数等进行改进。

### 1.2 平面结构的微型 ICP 激发源

美国东北大学的Hopwood等<sup>[10-12]</sup>于1999年首次提出了制作平面结构的微型ICP发生器的构想,并采用表面微机械加工技术在玻璃基片上制造了低压微型ICP发生器。这个微型等离子体源与集成电路工艺相兼容,性能稳定可靠,效率高,尺寸达到毫米量级且制造成本低。

收稿日期: 2007-10-08, 修订日期: 2008-01-12

基金项目: 河北省科技攻关计划项目(07217124), 河北省教育厅科研项目(2004408)和保定市科技与发展计划课题(06G10-2)资助

作者简介: 王永青, 1962年生, 河北大学电子信息工程学院教授, e-mail: hbuicp@yahoo.com.cn

### 1.2.1 原理及结构<sup>[10]</sup>

微型 ICP 激发源的等效电路如图 1 所示。感应线圈(LC)与电容器(CT)工作在谐振状态,以便在线圈附近产生强射频磁场。等离子体在邻近螺旋线圈的低压等离子体室中形成。将流经等离子体区域的电流等效为单匝电感( $L_p$ ),电子碰撞等效为电阻( $R_{pi}$ )。由于线圈与等离子体相邻,所以在线圈和等离子体电感之间存在互感( $M$ )<sup>[4]</sup>。因此,等效电路看起来像非理想的变压器,耦合系数为  $k = M / (L_c L_p)^{1/2}$ 。驱动此微型 ICP 发生器的射频功率源特征阻抗为 50  $\Omega$ 。电容器  $C_L$  用来消除电路中的感抗,并使得微型 ICP 激发源的阻抗与射频源相匹配。

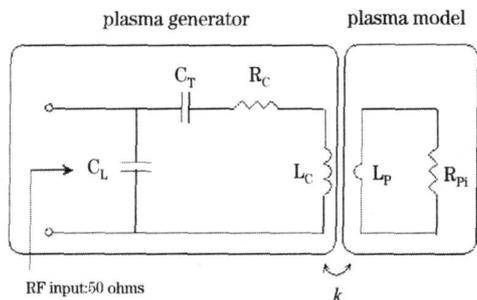


Fig 1 Equivalent circuit of an inductively-coupled plasma generator

与早期微型 ICP 激发源使用的三维螺旋线圈不同,此处微型 ICP 的感应线圈采用平面螺旋结构,这与微机械加工工艺相兼容。线圈的直径为 5 mm,匝数为 3 匝,每匝的宽度为 400  $\mu\text{m}$ ,匝间有 100  $\mu\text{m}$  的间隙。构成阻抗匹配网络的电容器具有梳齿状结构,如图 2 所示,每个齿的宽度和齿与齿之间的间隙由于工艺限制和击穿电压强度而设定为 10  $\mu\text{m}$ 。线圈和电容器采用镀金加工处理,镀金厚度为 7  $\mu\text{m}$ 。镀金结构可以在未密封的装置中至少运行 3 个月。

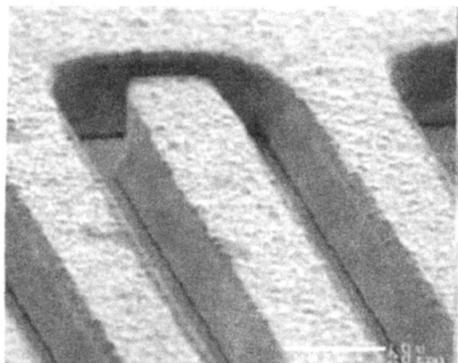


Fig 2 A scanning electron micrograph of a portion of one interdigitated capacitor

### 1.2.2 加工制作和封装<sup>[10, 14]</sup>

采用表面微机械加工技术制作微型 ICP 激发源的工艺流程如图 3 所示<sup>[4, 8]</sup>。首先,在 700  $\mu\text{m}$  厚的玻璃基片表面依次溅射沉积 30 nm 的 Cr 附着层、100 nm 的 Au 种子层和 30 nm 的 TiW 层。旋涂光刻胶,经曝光和显影后形成 15  $\mu\text{m}$  厚的电镀掩膜。用湿法刻蚀技术刻蚀掉 TiW 附着层,使 Au 种

子层暴露出来。在 Au 种子层上电镀 7  $\mu\text{m}$  厚的 Au 微结构。去除光刻胶,以电镀 Au 层作为掩膜刻蚀掉最初的溅射层。至此,平面螺旋线圈和梳齿状电容器微结构加工完毕。

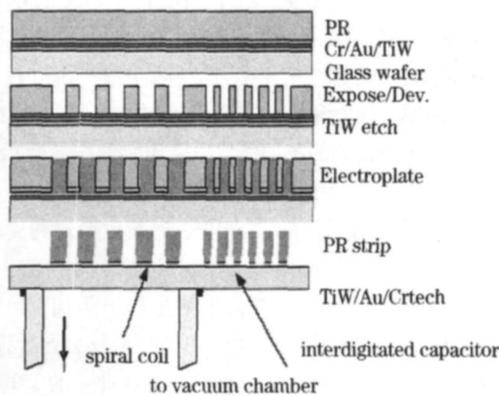


Fig 3 Processing used to surface micromachine the micro-ICP

在加工后的基片中切割出含有平面螺旋线圈和梳齿状电容器的独立电路小片,并将电路小片与 6 mm 厚的 Al 衬底键合在一起,在这个 Al 衬底中含有一个直径为 6 mm 的圆柱形真空室,等离子体在室中产生并在室中对气体样品进行激发,如图 4 所示。



Fig 4 A micromachined inductively coupled plasma generator sustains an argon discharge. The coil shown at the center is 5 mm in diameter

### 1.2.3 性能

上述微型 ICP 激发源工作在 13.3~1333 Pa 的气压范围内,工作频率约为 450 MHz,工作气体为氩气<sup>[11]</sup>。在工作气压范围内,用朗缪尔等离子探针测得电子温度在 1~3 eV 范围,氩离子的电流密度可达到 4.5  $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[13]</sup>。

### 1.2.4 气体激发效果

目前,微型 ICP 激发源的研究还处于应用基础研究阶段,对其激发能力的报道甚少。Hopwood 等<sup>[14]</sup>研制的微型 ICP 激发源对  $\text{SO}_2$  气体样品激发,配有分辨率约为 1 nm 的 EG&G 光学多道分析器来探测  $\text{SO}_2$  的分子发射光谱, $\text{SO}_2$  的检出限最低可达 45 ppb ( $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ )<sup>[18]</sup>。因为微型 ICP 激发源在 100 Pa 氩气条件下点燃工作,产生的等离子体属于低温冷等离子体,因此,作者预计其光谱激发特性类似于同为低温冷等离子体的辉光放电等离子体激发源。

### 1.3 基于 PCB 工艺的微型 ICP 激发源

微型 ICP 中激发放电室组件包括平面螺旋线圈、梳状交指电容器和放电室等。

本设计中作者设计制作了平面结构的螺旋线圈和梳状交指电容器,采用双面 PCB 加工工艺将它们分别加工在 PCB (基板为环氧玻璃布层压板)的顶层和底层上,用金属化过孔实现顶层和底层之间的电气连接,最后采用镀 Au 处理。设计加工的平面螺旋线圈和梳状交指电容照片见图 5。同时作者还设计加工了激发源的不锈钢放电室照片如图 6 所示。在实验中选用的平面螺旋线圈外径为 10 mm,匝数为 3 匝,匝宽为 400  $\mu\text{m}$ ,匝间有 250  $\mu\text{m}$  的间隙。谐振电容器的交指线为 20 条,交指线长 15 mm,宽 300  $\mu\text{m}$ ,指间间距 300  $\mu\text{m}$ ,电容量为 22 pF。由于加工工艺的限制在 PCB 上加工出的交指电容的容量很小,不易与线圈在 13.56 MHz 处产生谐振,所以作者在谐振梳状交指电容器的两端并联分立的 1 000 pF 的瓷片电容来增大电容量,以实现线圈与电容的谐振。匹配电容器的交指线 60 条,交指线长 15 mm,宽 300  $\mu\text{m}$ ,指间间距 300  $\mu\text{m}$ ,电容量 36 pF。

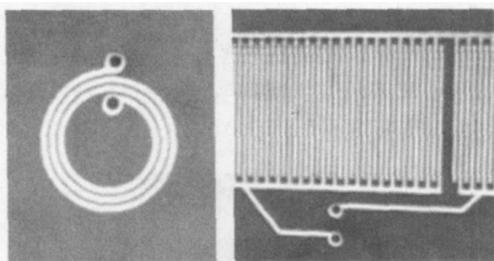


Fig. 5 Microfabricated planar spiral coil and interdigital capacitors on PCB

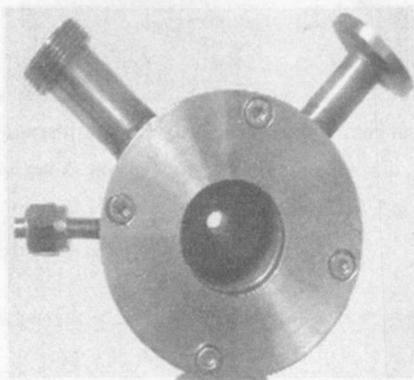


Fig. 6 Photograph of the stainless steel chamber

对所设计的 ICP 发生器进行的启燃实验,当入射功率为 3.5 W,反射功率为 0.1 W,氩气气压为 100 Pa,对 ICP 组件提供 13.56 MHz 的 RF 功率成功的启燃了等离子体火炬,等离子体启燃后的照片如图 7 所示。实验表明,采用 PCB 镀金工艺加工微结构的微型 ICP 激发源是可行的,具有工艺简单、成本低等优点。

作者设计的这种新型的基于 PCB 镀金工艺的微型 ICP,由于时间和设备等的限制还没有对其进行样品激发实验,但

是由于这种 PCB 工艺加工过程比较简单、成本低等优点,预计在微型光谱仪中会有广阔的应用前景。

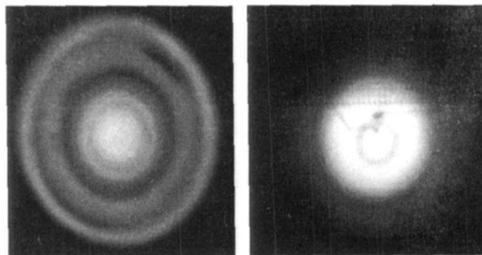


Fig. 7 Photos of plasma ignition created by micro ICP source based on PCB technology

## 2 微型 ICP 激发源在光谱仪中的应用前景

微型 ICP 因其体积小、功耗低、氩气消耗量少等优点,预计在便携式微型光谱仪中有着广阔的前景。Hopwood, McCruer 等<sup>[19,21]</sup>正在研制一种基于 MEMS 技术的低成本、低功率的微型气体分析仪(MGA),拟用于对危险废料焚化炉和金属加工工业产生的有毒气体进行实时监测,其结构见图 8<sup>[21]</sup>。采用微型 ICP 激发源和微型 Fabry-Perot 分光检测器构成微型光谱仪来测量原子和分子发射光谱。

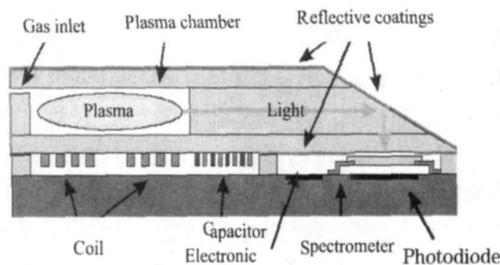


Fig. 8 Configuration of micro gas analysis system

## 3 结束语

微型 ICP 激发源产生的等离子体属于低气压低温冷等离子体,作者预计其光谱激发特性类似于同为低温冷等离子体的辉光放电等离子体激发源。目前微型 ICP 激发源仅能用于气体样品的分析。作者研制的微型 ICP 激发源的感应线圈和电容器均采用平面微结构,与微机械加工技术和 PCB 工艺等技术相兼容,另外其工作频率远远低于国外的报道,有利于降低 RF 驱动电路成本。微型 ICP 激发源与微型光谱仪相结合将促进光谱仪的微型化,使其可应用于现场测试领域,预计还有望用于空间探索中的分析测试。

致谢:本工作得到了钢铁研究总院分析测试所(国家钢铁材料测试中心)博士生导师王海舟教授和李小佳教授的指导帮助,特此致谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] ZHENG Guo-jing(郑国经). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2000, (2): 3.
- [ 2 ] WANG Yong-qing, MA Wen, et al(王永清, 马雯, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2006, 26(4): 40.
- [ 3 ] Zavracky P M, DenisK L, Xie H K, et al. Proceedings of SPIE, 1998, 3514: 179.
- [ 4 ] Zavracky P M. A Fabry-Perot Spectrometer Microspectrometer Fabricated Using Surface Micromachining Technology[EB/OL]. <http://www.ece.neu.edu/edsnu/zavracky/mlf/programs/spec/microspe.html>, 2005-03-15.
- [ 5 ] WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WANG Jian-guo(温志渝, 陈刚, 王建国). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1955.
- [ 6 ] JU Hui, WU Yi-hui(鞠挥, 吴一辉). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2001, 9(4): 372.
- [ 7 ] JU Hui, WU Yi-hui(鞠挥, 吴一辉). Micronanoelectronic Technology(微纳电子技术), 2003, 40(1): 30.
- [ 8 ] SHI Jun-feng, HU Mei, WANG Dong-sheng, et al(史俊锋, 惠梅, 王东生, 等). Optical Technique(光学技术), 2003, 29(1): 13.
- [ 9 ] Yin Y, Messier J, Hopwood J. IEEE Trans. Plasma Sci., 1999, 27(5): 1516.
- [ 10 ] Hopwood J. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(3): 309.
- [ 11 ] Hopwood J, Minayeva O, Yin Y. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2000, 18(5): 2446.
- [ 12 ] Hopwood J. United States Patent: 5942855, 1999-8-24.
- [ 13 ] Minayeva O B, Hopwood J. Journal of Applied Physics, 2003, 94(5): 2821.
- [ 14 ] Minayeva O B, Hopwood J A. J. Anal. At. Spectrom., 2002, 17(9): 1103.
- [ 15 ] Hopwood J. Microplasma Research[EB/OL]. [http://www.ece.neu.edu/edsnu/hopwood/microICP\\_old.html](http://www.ece.neu.edu/edsnu/hopwood/microICP_old.html), 2006-09-15.
- [ 16 ] Hopwood J. Microplasma Research [EB/OL]. <http://www.ece.neu.edu/edsnu/hopwood/microicp.html>, 2007-03-15.
- [ 17 ] CHEN Jin-zhong, HA Jing, WEI Yan-hong, et al(陈金忠, 哈静, 魏艳红, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1707.
- [ 18 ] Minayeva O B, Hopwood J A. J. Anal. At. Spectrom., 2003, 18(8): 856.
- [ 19 ] Hopwood J A, McGruer N. A Microfabricated Gas Analysis System[EB/OL]. <http://www.ece.neu.edu/edsnu/hopwood/tamp-proceedings.pdf>, 2005-04-17.
- [ 20 ] Hopwood J A, McGruer N. Proposal # 1: Development of a MEMS Based Micro Gas Analysis System[EB/OL]. [http://www.cmc.neu.edu/pdf/Proposals/micro\\_gas\\_analysis\\_system.pdf](http://www.cmc.neu.edu/pdf/Proposals/micro_gas_analysis_system.pdf), 2007-03-15.
- [ 21 ] Hopwood J A. Microplasma: Physics and Applications[EB/OL]. [http://www7.nationalacademies.org/bpa/PLSC\\_MtgFall2003\\_Hopwood.pdf](http://www7.nationalacademies.org/bpa/PLSC_MtgFall2003_Hopwood.pdf), 2007-03-15.
- [ 22 ] McGruer N, Hopwood J, Minayeva O, et al. A Microfabricated Micro Gas Analysis System[EB/OL]. [http://www.coe.neu.edu/research/cmc/pdf/Presentations/IUCRC\\_MicroGas%20Analyzer.ppt](http://www.coe.neu.edu/research/cmc/pdf/Presentations/IUCRC_MicroGas%20Analyzer.ppt), 2005-04-17.

## A Microfabricated ICP Source Base on Planar Spiral-Shaped Coil

WANG Yong-qing<sup>1, 2</sup>, LOU Jian-zhong<sup>1</sup>, SUN Rong-xia<sup>1</sup>, MA Wen<sup>3</sup>, TANG Yu-jun<sup>1</sup>, PU Yong-ni<sup>1</sup>

1. College of Electronic & Informational Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China

2. Central Iron & Steel Research Institute, National Testing Center of Iron & Steel, Beijing 100081, China

3. The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China

**Abstract** Along with the development of micro-electromechanical system technology, the reports on the optical splitting systems and the photoelectric detection systems of spectrometer based on micro-electromechanical system have become increasingly popular, whereas the reports on micro excitation source in the development of micro spectrometer are few. In other words, the development of micro excitation source is the most important part in the development of the micro spectrometer. A novel low-pressure microfabricated inductively coupled plasma source is introduced, which is an emission spectrum excitation source based on surface-micromachining technology. Its radio frequency power consumption is much lower than the general inductively coupled plasma source. The source can work at an argon gas pressure of 100 Pa, and thus consumes less argon. The principle of operation for a microfabricated inductively coupled plasma source is illustrated. The layout of the planar spiral-shaped coil, the matched capacitor and the resonant capacitor is given. The fabrication process and properties of the plasma source are described. Meanwhile a novel inductively coupled plasma based on the technology of printed circuit board is introduced. In the experiment, the planar spiral-shaped coil and interdigital capacitor were used. When the pressure of argon was 100 Pa and the radio frequency power

was 3.5 W at 13.56 MHz the novel inductively coupled plasma was ignited. The photo of the argon ignition is given. Finally the potential application of the micro inductively coupled plasma in spectrometers is presented.

**Keywords** Atomic emission spectrum; Surface micromachining technology; Microfabricated ICP source; Spectrometer; Planar spiral-shaped coil

(Received Oct. 8, 2007; accepted Jan. 12, 2008)

## 《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,2009年仍为月刊,每期288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300字为宜,英文摘要以2000字符(相当于300个英文单词)为宜;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,本刊在2007年7月1日以后,不再接收以邮寄方式或e-mail方式的投稿,只收网上在线投稿。严禁“一稿两投”、“一稿多投”,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。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(另请备一份合格的图附在文章的后边)。
- 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两本,本人文章两份抽页。
- 4 遵照“中华人民共和国著作权法”,投稿作者须明确表示,该版权(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北京市海淀区魏公村学院南路76号,光谱学与光谱分析期刊社

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