

文章编号 1004-924X(2014)04-0870-07

分波段式中阶梯光栅原子发射光谱仪

朱文煜¹, 陈少杰^{2*}, 撒芃芃², 崔继承², 曹海霞^{2,3}, 巴音贺希格², 齐向东², 唐玉国²

(1. 长春光机医疗仪器有限公司, 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:受探测器发展水平的限制,以中阶梯光栅光谱仪为分光模块的 ICP-AES 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)难以实现宽波段内多元素的同时测量。本文对现有中阶梯光栅光谱仪进行了改进,设计出一种适用于 ICP-AES 多元素同时测量的分波段式中阶梯光栅光谱仪。通过改变棱镜的入射角度,将系统波长扩展为 200~900 nm,光谱分辨率为 25 000,突破了现有探测器尺寸的限制,实现了宽波段范围内的多元素快速测量。将中阶梯光栅光谱仪与固态 ICP 光源组合,进行了系统波长标定与化学试样测试。实验结果表明:波长测试误差小于 0.01 nm,满足化学元素精确判读要求;分波段式中阶梯光栅光谱仪在保持原有仪器性能的前提下,增宽了仪器的有效光谱探测范围,为多元素的同时测量提供了有效手段。

关键词:原子发射光谱仪;电感耦合等离子体;中阶梯光栅光谱仪;中阶梯光栅;

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0870

Echelle-emission spectrometer with divided spectral coverage

ZHU Wen-yu¹, CHEN Shao-jie^{2*}, HAN Peng-peng², CUI Ji-cheng², CAO Hai-xia^{2,3},
BAYANHESHIG², QI Xiang-dong², TANG Yu-guo¹

(1. Changchun Medical Instrument Co., Ltd., Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: shaojie.csj@gmail.com

Abstract: Limited by the development of detectors, the Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry(ICP-AES) based on an echelle spectrograph is difficult to complete the multiple element measurement at a wider spectral coverage. This paper focuses on the improvement of an existing echelle spectrograph. It designs a new wider band echelle spectrograph suitable for ICP-AES to measure multiple elements simultaneously. By changing the incident angle of the prism, the wavelength of system is extended 200—900 nm with a spectral resolution of 25 000, which breaks the limitation of existing detector sizes, and realizes rapid and simultaneous measurement for multiple elements at a wider

收稿日期:2013-01-17;修订日期:2013-02-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61108032);国家重大科研装备研制资助项目(No. ZDYZ2008-1);中国科学院重大科研装备研制资助项目(No. YZ200804);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 11YQ120023);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005)

spectral range. By combination the Echelle spectrograph and a ICP, several specimens are measured and analyzed. Experiments show that the ICP-AES with Echelle spectrograph is available to detect multiple elements within a short time correctly, and the wavelength precision is better than 0.01 nm. The wavelength range, optical spectral resolution and the precision of wavelength calibration of the Echelle spectrograph meet the design needs.

Key words: atomic emission spectrometer; inductively coupled plasma; echelle spectrometer; echelle grating

1 引言

电感耦合等离子体原子发射光谱分析技术是材料领域中应用最为广泛的元素分析方法之一。电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, ICP-AES)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,在冶金、石油化工、机械制造、金属加工等工业生产中发挥着巨大作用^[1-5]。在冶金分析领域,如钢铁、原材料、铁合金中每次要求测定几十至几百个样品,而且每个样品需要同时分析 Mn、Cu、Al、Cr、Si、P、Ni、Ti、V、Nb、W、Ca、Mg 等几十种低含量元素,因此对测试仪器的光谱范围、光谱分辨率、灵敏度、检出限要求十分严格。

ICP-AES 以中阶梯光栅光谱仪为分光模块,具有波段范围宽、分辨率高、灵敏度高等特点,现已成为原子发射光谱分析技术研究的重点^[6-8]。目前,由于仪器成本的限制以及波段范围、光谱分辨率的严格要求,ICP-Echelle AES 的光谱分析模块——中阶梯光栅光谱仪仍然存在较多关键技术有待进一步研究。我国对中阶梯光栅光谱仪的研究起步于 2008 年,由中国科学院长春光机所研制出国内第一台中阶梯光栅光谱仪原理样机,其光谱仅为 300~800 nm,不能满足 ICP-AES 的测试要求。

在现有探测器的基础上,利用中阶梯光栅与棱镜交叉色散的结构形式难以实现 200~900 nm 波段内的高分辨率一次性成像^[9-10]。为了实现这一目标,不同的研究机构采用了不同的实现方法,如像面平移方式,双光路方式,复合棱镜方式等^[11-12],但是以上方式均存在较大的限制。本文提出一种分段测量式中阶梯光栅光谱仪结构,通过改变棱镜角度分别完成了 200~400 nm,400~900 nm 波段的成像测量,并在现有探测水平情况

下,实现了 200~900 nm 波段内的快速测量。该结构形式虽然无法实现全固态测量,但提高了紫外波段像面的利用率,得到了系统积分时间与量子效率之间的关系。将分波段测量式中阶梯光栅光谱仪与固态式 ICP 光源组合,研制出我国首台宽波段中阶梯光栅电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Echelle ICP-AES),并在系统调试完成后进行了化学试样的测试分析。实验结果表明,分段式中阶梯光栅光谱仪测试简便、试样消耗量少,可实现宽波段多元素的快速测量,能够满足 ICP-AES 的性能需求。

2 ICP-AES 工作原理

电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)常作为原子发射光谱仪的光源系统,主要包括射频功率发生器、电感耦合部件以及产生等离子体炬的石英炬管和被电离的气体(通常为氩气 Ar)。通向炬管的氩气共有 3 路,分别为等离子气、辅助气和载气。载气可以将雾状液态物送入离子体炬,液体试样在载气的带动下,经毛细管吸取、雾化器制雾后在雾室内稳定压力并分离出较大雾滴,进而形成气溶胶,最后经炬管的中心通道进入等离子体炬中。对于固体试样,须经预处理将其制备成水溶液,而对于有一定黏稠度的液体试样,如油质,则可将毛细管置入能调整转速的蠕动泵,辅助输送溶液^[2]。

用等离子体作激发光源时,需要专门的进样装置将试样引入光源。进样装置由雾化器和雾室组成,用以产生试液的气溶胶,之后输入等离子体炬的中心管。在 ICP-AES 中,一套理想的 ICP 进样系统要求雾化器有较低的载气流量(0.5~1.5 L/min)、较低的吸出率(一般小于 3 L/min)、较小的记忆效应、良好的时间稳定性、较好的抗腐蚀能力并且适用于高盐分溶液的雾化。进样系统主要

包括雾化器、毛细管、炬管等。雾化器的雾化效率直接影响测定的灵敏度,其影响最高可达 3%~4%。毛细管壁厚度一般为 0.08 mm,间隙为 0.02~0.04 mm,提升量为 1~3 L/min。炬管是一个外径为 20 mm 的三层同心石英管,放置在一个连接射频发生器的线圈里。当电源接通时,射频功率发生器产生的电流通过线圈,在石英炬管内产生交变电磁场,使通入其中的氩气电离,形成一个稳定的火焰状高温放电炬——等离子体,温度高达 10 000 K,是一个具有良好蒸发-原子化-激发-电离性能的光谱光源。样品的气溶胶通过中心内管喷入等离子体中,形成一个直径为 2 mm 左右的分析通道,样品元素电离后外层电子发生跃迁发射出特征谱线。不同元素发出的特征谱线通过分光系统进行色散,并由探测器接收。最后,根据特征谱线的波长信息以及强度信息对试样中所含的微量元素进行定性、定量分析。

3 分段测量式中阶梯光栅光谱仪设计

中阶梯光栅光谱仪是一种高分辨率、高精度的新型光谱仪器。它采用中阶梯光栅作为主色散元件,经棱镜横向色散后,在像面上形成二维重叠光谱,具有高分辨率、宽波段、小体积等优点^[13-14]。中阶梯光栅光谱仪分光系统的光路结构如图 1 所示。光源经显微系统聚焦在入射针孔处,经离轴抛物镜准直后入射到中阶梯光栅进行主色散,然后入射到棱镜进行横向色散,交叉色散后经离轴抛物镜成像在 CCD 的像面上。在分光过程中,受探测器有效面积的限制,中阶梯光栅光谱仪的波段范围与光谱分辨率相互制约。

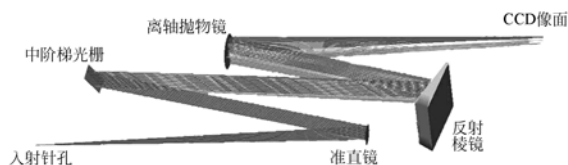


图 1 中阶梯光栅光谱仪光路图

Fig. 1 Scheme of echelle spectrometer

3.1 中阶梯光栅光谱仪结构参数

本文改进了现有仪器,采用棱镜旋转的方式实现宽波段中阶梯光栅光谱仪的设计。现有中阶梯光栅光谱仪的结构参数如表 1 所示。

表 1 中阶梯光栅光谱仪结构参数

Tab. 1 Parameters of echelle spectrometer

结构参数	数值
波段范围	300~800 nm
光谱分辨能力	0.015 nm@400 nm
光栅刻线密度	54.49 g/mm
光栅入射角	46°
光栅偏置角	7.54°
系统焦距	322 mm
棱镜顶角	26°
棱镜入射角	27.2°

通过光学优化设计,该仪器在波段范围内具有较好的成像质量与光谱分辨率。选择探测器时,考虑了仪器的光学性能,由于中阶梯光栅光谱仪具有高灵敏度与低检出限的特点,所以选择了具有低噪声、高量子效率的探测器。现有仪器采用高灵敏度的紫外增强型面阵 CCD 相机 (PIXIS1024BUV) 作为系统的探测器,其性能指标如表 2 所示。CCD 芯片在 200~850 nm 波段具有较均匀的量子效率。工作时,制冷温度可达到 -70 °C,通过设置不同的积分时间进行微弱信号测试,能够满足 ICP-AES 高灵敏度与低检出限的性能需求。

表 2 PIXIS 1024BUV 性能参数

Tab. 2 Parameters of PIXIS 1024BUV

性能参数	数值
像元尺寸	13 μm
像元数暗电流噪声	0.001e ⁻ /(p·s ⁻¹)
读出噪声	3.6e ⁻ rms
量子效率	>50% @200~800nm
波段	200~1 000 nm
制冷温度	-70 °C
响应非线性	<1% @100 kHz

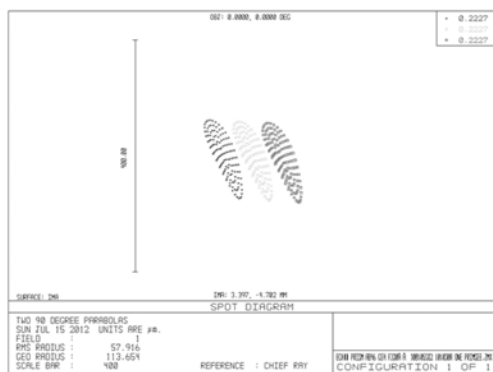
3.2 宽波段的计算与设计

在中阶梯光栅光谱仪中,横向色散的作用是将经中阶梯光栅色散后重叠在一起的光谱按照级次分开,其色散能力对系统的光谱分辨能力无影响;但考虑到光谱范围、级次干扰、探测器的利用率等因素,需要精确计算横向色散参数。由棱镜色散原理进一步推导得:

$$\beta_{\lambda} = \arcsin \{ n_{\lambda} \times \sin [\phi - \arcsin (\frac{\sin \alpha}{n_{\lambda}})] \}, \quad (7)$$

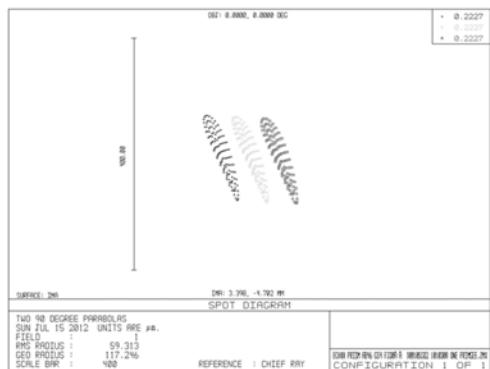
其中: β_λ 为色散角, n_λ 为不同波长下棱镜的折射率, α 为棱镜入射角, ϕ 为棱镜顶角。不同波长的光线对应不同的出射角,出射角的大小决定了谱线在像面上级次方向的坐标位置。为了有效避免级次干扰,并考虑棱镜色散非线性的影响,利用现有的探测器无法实现系统200~900 nm的一次性成像。因此,宽波段、高分辨率的中阶梯光栅光谱仪设计仍是光谱仪器研究的重点。

本文采用分波段测量式中阶梯光栅光谱仪结构,通过改变棱镜入射角度实现200~900 nm波段的测量。由光学系统的像差分析可知,棱镜的转动角度对系统像差的影响较小,主要影响系统二维光谱的横向色散位置分布。棱镜在不同角度下的点列图如图2所示,以118级为例,通过光学仿真可得仪器在不同入射角度下的光谱分辨率为2 500。



(a) 棱镜入射角为 27.56°

(a) Incidence angle of 27.56°



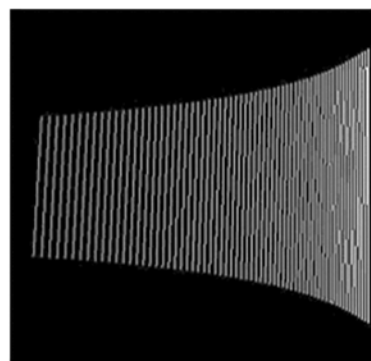
(b) 棱镜入射角为 27.10°

(b) Incidence angle of 27.10°

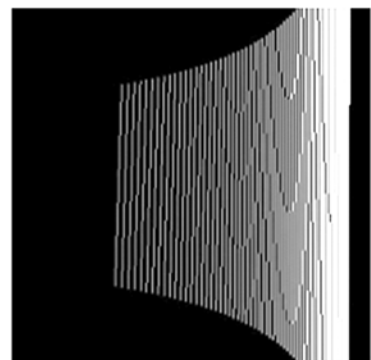
图2 不同入射角情况下相同级次波长点列图

Fig. 2 Spot diagrams of order 118 under different incidence angles

经计算分析可知,中阶梯光栅光谱仪在两个角度下即可完成200~900 nm波段的光谱覆盖(具体计算方法请参照文献[15])。第一个波段为200~400 nm,棱镜入射角为27.56°;第二个波段为400~900 nm,棱镜入射角为27.10°。图3为不同波段的二维光谱模型,探测器可覆盖上述两个波段的成像区域,两次成像的谱图可拼接为200~900 nm的完整谱图。



(a) 200~400 nm



(b) 400~900 nm

图3 中阶梯光栅光谱仪二维光谱模型

Fig. 3 Two dimensional models of broad range echelle spectrometer

由于棱镜在短波范围内色散能力较强,在长波范围内色散能力较弱,所以在入射角相同的情况下,短波段级次间隔较大,而长波段级次间隔较小。该结构形式有利于提高紫外波段探测像面的利用率。

为了解决级次不均匀问题,需讨论相邻波长在不同入射角度下的色散间距。设波长为 λ_i , λ_{i+1} ($\lambda_i < \lambda_{i+1}$) 的两条光线在不同入射角 α, α' ($\alpha > \alpha'$) 下的色散角度分别为 $\beta_{\lambda_i}, \beta_{\lambda_i}'$ 和 $\beta_{\lambda_{i+1}}, \beta_{\lambda_{i+1}}'$ 。所

以在不同入射角度下,相邻波长的色散角度差为:

$$\Delta\rho=(\beta_{\lambda_{i+1}}'-\beta_{\lambda_i}')-(\beta_{\lambda_{i+1}}-\beta_{\lambda_i})=$$

$$(\beta_{\lambda_{i+1}}'-\beta_{\lambda_{i+1}})-(\beta_{\lambda_i}'-\beta_{\lambda_i}). \quad (8)$$

根据微分定义可得:

$$\beta_{\lambda_{i+1}}'-\beta_{\lambda_{i+1}}=\frac{d\beta_{\lambda_{i+1}}(\frac{\alpha+\alpha'}{2})}{d\alpha}\times(\alpha'-\alpha), \quad (9)$$

$$\beta_{\lambda_i}'-\beta_{\lambda_i}=\frac{d\beta_{\lambda_i}(\frac{\alpha+\alpha'}{2})}{d\alpha}\times(\alpha'-\alpha). \quad (10)$$

将式(9)、(10)带入式(8)得:

$$\Delta\rho=(\alpha'-\alpha)\times(\frac{d\beta_{\lambda_{i+1}}(\frac{\alpha+\alpha'}{2})}{d\alpha}-\frac{d\beta_{\lambda_i}(\frac{\alpha+\alpha'}{2})}{d\alpha}), \quad (11)$$

此时 $\Delta\rho$ 是关于折射率的函数, λ_i, λ_{i+1} 对应的折射率为 n_i, n_{i+1} 。根据微分定义进一步可得:

$$\Delta\rho=(\alpha'-\alpha)\times(n_{i+1}-n_i)\times\frac{\partial^2\beta}{\partial\alpha\partial n}. \quad (12)$$

本系统中, $\alpha=27.96^\circ, \alpha'=27.32^\circ$, 则有:

$$\Delta\rho=(\alpha'-\alpha)\times(n_{i+1}-n_i)\times\frac{\partial}{\partial n}(\frac{\partial\beta}{\partial\alpha}(27.64)). \quad (13)$$

根据分析可知, $\alpha'-\alpha<0, n_{i+1}-n_i<0$, 令 $\tau=$

$\frac{\partial}{\partial n}(\frac{\partial\beta}{\partial\alpha}(27.64))$, τ 是折射率 n 的函数。

通过计算可得, 当 $n=1.49$ 时 ($\lambda\approx 290$ nm), $\Delta\rho=0$, 即在 200~290 nm 波段, 相邻级次的色散角度差随入射角度的增大而减小。根据中阶梯光栅光谱仪特性可知, 在紫外波段中阶梯光栅的自由光谱区小, 级次间隔大。在 200~400 nm 波段, 200~290 nm 衍射级次为 91~133, 而 290~400 nm 的衍射级次为 65~90, 由此可知紫外波段内未能充分利用探测像面。通过增大棱镜在紫外波段的入射角可以减小级次间距离, 有利于像面的充分利用。

虽然分段式中阶梯光栅光谱仪未实现 200~900 nm 的全固态测量, 但在一定程度上解决了宽波段、高分辨率中阶梯光栅光谱仪设计的难题, 而且其波段(200~400 nm)能够满足绝大多数原子发射光谱分析的需要。分波段范围的设计能为特殊用户提供全谱段测试的条件。

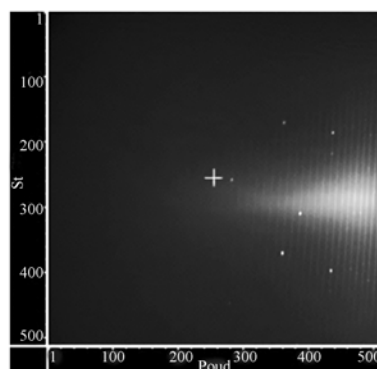
4 实验测试与分析

4.1 实验测试

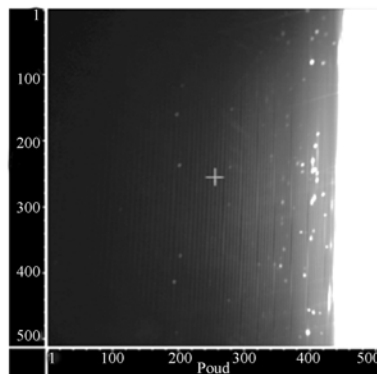
实验条件为: 空冷自激式射频功率发生器的

频率为 40.68 MHz, 输出功率为 1.2 kW, 辅助气流量为 1.5 L/min, 雾化气流量为 0.55 L/min, 等离子气流量为 15.0 L/min, 蠕动泵泵速为 15 r/min。本实验完成了对 Se, Zn, Mn, Cu, Ba, Mg, Ca, Si, C, K, Na 元素混合溶液的测试, 根据溶液中各元素的特征波长判读出溶液中所含元素。采用不同的积分时间, 分别对 200~400 nm, 400~900 nm 的两个波段进行测试。

由于本系统属于非固态测量, 在测试过程中需要转动棱镜来完成 200~900 nm 的谱线测量。为了保证测试的准确性, 在每次测试过程中需要标定谱图位置。在测试过程中, 中阶梯光栅光谱仪充氩气以完成紫外波段的测量, 通过分析 Ar 的特征谱线可知, 其特征谱线分布于 300~520 nm, 可用于实现 200~400 nm, 400~900 nm 两个波段的谱线标定。本文利用 Ar 的特征谱线对棱镜角度进行精确定位, 并完成系统参数的确定与调整。实验拍摄的化学试样的二维光谱信息如图 4 所示。



(a) 200~400 nm



(b) 400~900 nm

图 4 ICP-EchelleAES 测试谱图

Fig. 4 Two-dimensional echelle spectra of ICP-Echelle AES

4.2 实验数据处理与标定结果

通过二维谱图还原计算,以 Ar 元素的特征波长标定系统。标定后对溶液中 Se,Zn,Mn,Cu,Ba,Mg,Ca,Si,C,K,Na 元素进行测试,其测试结果如表 3 所示。每种元素有多种特征谱线,但其

表 3 各元素波长测试结果

Tab. 3 Results of spectral analysis for mixed solution

波段:200~400 nm 棱镜入射角:27.56°				
元素	特征波长 /nm	实测谱线位 置(X,Y)	实测波长 /nm	波长测试 误差/nm
Ar	355.431	(480,225)	355.431	0
Se	203.985	(69,213)	203.986	0.001
Zn	213.856	(132,222)	213.861	0.005
Mn	257.610	(315,250)	257.614	0.004
Cu	324.754	(446,222)	324.752	0.002
Mg	279.079	(369,293)	279.080	0.001
Ca	315.889	(434,307)	315.894	0.005
Si	288.158	(388,304)	251.157	0.001
C	247.856	(284,253)	274.865	0.001
波段:400~900 nm 棱镜入射角:27.10°				
元素	特征波长 /nm	实测谱线位 置(X,Y)	实测波长 /nm	波长测试 误差/nm
Ar	415.859	(331,326)	415.860	0.001
Ba	455.403	(350,114)	455.415	0.008
K	766.490	(409,460)	766.498	0.008
Na	588.995	(387,23)	589.004	0.009

参考文献:

[1] 陆文伟. 等离子体发射光谱仪分类与“全谱直读”一词[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(2), 348-349.
LU W W. The classification of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and the words ‘full wavelength range direct reading’ [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(2), 348-349. (in Chinese)

[2] 王丽君, 王文焱, 李致清. ICP-AES 光谱仪的技术特点[J]. 现代仪器, 2005(3): 54-55.
WANG L J, WANG W Y, LI ZH Q. Technical features of ICP-AES[J]. *Modern Instruments*, 2005 (3): 54-55. (in Chinese)

[3] 郑国经. 原子发射光谱仪器的新进展[J]. 现代科学仪器, 2000(2): 3-5.
ZANG G J. New development of atomic emission spectrometer[J]. *Modern Scientific Instruments*,

检出限有较大的差别, 本实验仅给出了能量较强、较为容易辨别的特征谱线标定结果。通过测试分析元素的特征谱线, 可得出波长的测试误差均小于 0.01 nm, 能够有效避免仪器产生元素误读。

5 结 论

针对 ICP-AES 的测试需求, 本文改进了现有的中阶梯光栅光谱仪, 采用分段测量的结构形式, 保持了原有中阶梯光栅光谱仪高分辨率、高灵敏度、低噪声、小体积的优点, 在现有探测器的条件下增宽了光谱波段范围, 为 ICP-AES 的多元素同时测量提供了有效手段。将该光栅光谱仪与固态式 ICP 光源结合, 设计出我国首台具有自主知识产权的 Echelle ICP-AES, 并进行了实际测试分析。测试结果表明, Echelle ICP-AES 的测试误差小于 0.01 nm, 可以实现多元素的同时测量, 其波长范围与光谱分辨率满足化学元素分析需求。但由于探测器的限制, 同时综合考虑系统的体积、成本等因素, Echelle ICP-AES 尚未实现全固态测量。在后续工作中, 将对其分光系统进行优化, 通过不断改进结构设计来实现宽波段的固态测量。

2000(2): 3-5. (in Chinese)

[4] 郑国经. ICP 分析技术的发展及其在冶金分析中的应用[J]. 冶金分析, 2001, 21(1): 36-43.
ZANG G J. Development of ICP-AES and its application in metallurgical analysis[J]. *Metallurgical Analysis*, 2001, 21(1): 36-43. (in Chinese)

[5] 纪杉, 计子华, 端裕树. 用高分辨率电感耦合等离子体-原子发射光谱仪测定高纯铬中的杂质元素[J]. 分析科学学报, 2006, 22(2): 222-224.
JI SH, YU Z H, DUAN Y SH. Determination of trace elements in high-purity chromium by ICP-AES instrument with high resolution[J]. *Journal of Analytical Science*, 2006, 22(2): 222-224. (in Chinese)

[6] 辛仁轩. 原子发射光谱仪[J]. 分析测试仪器通讯, 1996(3): 149-167.
XIN R X. Atomic emission spectrometer[J]. *Analytical and Testing Instruments Communication*,

- 1996(3):149-167. (in Chinese)
- [7] KOCH J, OKRUSS M, FRANZKE J, *et al.*. Element-selective detection of gas chromatographic eluates by near infrared Echelle optical emission spectrometry on microwave-induced plasmas[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2004, 59:199-207.
- [8] LUAN SH, SCHLEICHER R G, PILON M J, *et al.*. An echelle polychromator for inductively coupled plasma optical emission spectroscopy with vacuum ultraviolet wavelength coverage and charge injection device detection [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2001, 56:1143-1157.
- [9] LINA X, DAVONPORT M A, TURNER M A, *et al.*. Compressive echelle spectroscopy [J]. *SPIE*, 8165:81650E1-12.
- [10] FLOREK S, HARSCH C, OKRUSS M, *et al.*. A new, versatile echelle spectrometer relevant to laser induced plasma applications [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2001, 56: 1027-1034.
- [11] NATHAN H, TKACZYK T S. Compound prism design principles I[J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (25):4998-5011.
- [12] EBIZUKA N, YOKOTA H, KAJINO F, *et al.*. Novel direct vision prism and wollaston prism assembly for diffraction limit applications[J]. *SPIE*, 2008, 7018:70184S-16.
- [13] 唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(9), 1989-1995.
- TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9), 1989-1995. (in Chinese)
- [14] LINDBLOM P. New compact Echelle spectrographs with multichannel time-resolved recording capabilities[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 380:353-361.
- [15] 唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪谱图还原与波长标定[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10):2130-2136.
- TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10), :2130-2136. (in Chinese)

作者简介:



朱文煜(1960—),女,吉林长春人,工程师,主要从事精密仪器设计。E-mail: Zhuwenyu502@163.com

通讯作者:



陈少杰(1985—),女,黑龙江宁安人,博士研究生,助理研究员,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail:shaojie.csj@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)