

紫外可见分光光度计的发展与现状

倪 一 黄梅珍 袁 波 赵海鹰 窦晓鸣

(上海交通大学物理系 上海 200240)

E-mail: niyi@sjtu.edu.cn

摘 要 综述了紫外可见分光光度计及各模块单元的技术发展、现状和研究动态。通过对国内外 30 多个厂家的 150 多种不同型号紫外可见分光光度计有关技术和性能资料的整理和分析,对紫外可见分光光度计的各项技术性能指标进行了评述。

关键词 紫外可见分光光度计;发展;现状;技术指标

中图分类号 TH744.12

Development and Current Status of UV-VIS Spectrophotometer

Ni Yi, Huang Meizhen, Yuan Bo, Zhao Haiying, Dou Xiaoming
(Physics Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The development, current status and study trends of UV-VIS spectrophotometer and its composing parts are summarized. After collecting and analyzing data of over 150 different UV-VIS spectrophotometers from more than 30 corporations, performances of these spectrophotometers are commented.

Key words UV-VIS spectrophotometer; development; current status; specification

1 引言

紫外可见分光光度计是一类很重要的分析仪器,无论在物理学、化学、生物学、医学、材料学、环境科学等科学研究领域,还是在化工、医药、环境检测、冶金等现代生产与管理部门,紫外可见分光光度计都有广泛而重要的应用。紫外可见分光光度计有着较长的历史,其主要理论框架早已建立,制作技术相对成熟。但构成紫外可见分光光度计的光、机、电、算等任何一方面的新技术都可能再推动紫外可见分光光度计整体性能的进步。在追求准确、快速、可靠的同时,小型化、智能化、在线化、网络化成为了现代紫外可见分光光度计新的增长点^[1~2]。紫外可见分光光度计作为一项产业,用户的需求是其发展的根本动力,面向客户、以人为本是设计和制造紫外可见分光光度计应该遵循的法则。

本文通过对国内外 37 个厂家的 152 种不同型号紫外可见分光光度计有关技术和性能资料的整理和分析,综述了紫外可见分光光度计各模块单元的技术及整体性能的现状和发展趋势。重点对目前市场上

的两类主流产品:扫描光栅式分光光度计和固定光栅式分光光度计进行了比较和分析,概述了紫外可见分光光度计的研究动态和最新研究成果。对于光谱分析仪器设计制造企业和科研院所,尤其对广大仪器用户深入了解和选购紫外可见分光光度计具有参考价值。

2 紫外可见分光光度计的发展

分光光度法在分析领域中的应用已经有数十年的历史,至今仍是应用最广泛的分析方法之一。随着分光元器件及分光技术、检测器件与检测技术、大规模集成制造技术等的发展,以及单片机、微处理器、计算机和 DSP 技术的广泛应用,分光光度计的性能指标不断提高,并向自动化、智能化、高速化和小型化等方向发展。

在分光元器件方面,经历了棱镜、机刻光栅和全息光栅的过程,商品化的全息闪耀光栅已迅速取代一般刻划光栅。在仪器控制方面,随着单片机、微处理器的出现以及软硬件技术的结合,从早期的人工控制进步到了自动控制。在显示、记录与绘图方面,早期采用表头(电位计)指示、绘图仪绘图,后来用数字电

收稿日期:2003-10-21

作者简介:倪一(1979-),男,上海市人,上海交通大学光学专业博士生,主要研究方向为光谱仪器和光谱分析。

压表数字显示,如今更多地采用液晶屏幕或计算机屏幕显示。在检测器方面,早期使用光电池、光电管,后来更普遍地使用光电倍增管甚至光电二极管阵列。阵列型检测器和凹面光栅的联合应用,使仪器的测量速度发生了质的飞跃,且性能更加稳定可靠,受到仪器用户的青睐,最具有代表性的当数安捷伦的 HP8452/8453^[3]。在仪器构型方面,从单光束发展为双光束,现在几乎所有高级分光光度计都是双光束的,有些高精度的仪器采用双单色器,使得仪器在分辨率和杂散光等方面的性能大大提高,如 Varian (瓦里安)的 Cary1/3/400。随着集成电路技术和光纤技术的发展,联合采用小型凹面全息光栅和阵列探测器以及 USB 接口等新技术,已经出现了一些携带方便、用途广泛的小型化甚至是掌上型的紫外可见分光光度计,如 OceanOptics(海洋光学)的 S 系列、USB2000 及 PC2000^[4]。而光电子技术和 MEMS 技术的发展,使得有可能将分光元件和探测器集成在一块基片上,制作微型分光光度计^[5~7]。我国重庆大学在微型多通道光谱仪方面开展了卓有成效的研究工作^[8~10],承担的国家自然科学基金项目“微型多道光谱分析系统集成化技术研究”已经通过了技术鉴定。随着发光二极管(LED)光源技术及产业的日益成熟,以 LED 为光源的小型便携又低廉的分光光度计已成为研究开发的热点^[11]。除了空间色散的分光方式,也有人声光调制滤光^[12~14]和傅立叶变换光谱^[15]在紫外可见区的应用进行了研究。

仪器的软件功能可以极大地提升仪器的使用性能和价值,现代分光光度计生产厂商都非常重视仪器配套软件的开发。除了仪器控制软件和通用数据分析处理软件外,很多仪器针对不同行业应用开发了专用分析软件,给仪器使用者带来了极大的便利。

目前,市场上的紫外可见分光光度计主要有两类:扫描光栅型和固定光栅型。后者也常常被称为 CCD (PDA)光谱仪或多通道光度计。它们的主要构成:光源、分光系统、探测器和软件系统,以及它们的整体设计,将分述如下(这里不涉及电子和控制系统)。

光源 紫外可见区的光源主要采用卤素钨灯和氘灯或氙灯。钨卤素灯的工作波长范围为 320~2500nm,氘灯的工作波长范围为 180~375nm,两者组合使用。氘灯是新颖的光源,发光效率高,强度大,而且光谱范围宽,包括紫外、可见和近红外。扫描光栅型大多能在扫描过程中自动地完成光源切换动作,并自动转换滤光片,以消除高级次谱的干扰。固定光栅型为了保持其高速测量的优点,要避免光源切换,采用日本滨松光子学株式会社的专利产品 see-through

型氘灯^[16],可以方便地将氘灯和钨灯固定地组合起来。

分光系统 扫描光栅型的分光系统常称为单色仪,固定光栅型的分光系统则接近摄谱仪。单色仪大多布置在样品室之前,固定光栅型则必须把分光系统置于样品室之后。在紫外可见分光光度计的发展历史上,扫描光栅型出现过多种光路设计,主要如单光束、准双光束和双光束,还有双波长。单光束光路的漂移是主要问题,但现在也可通过元器件性能的提高、制造工艺的进步和软件校正加以改进。准双光束和真正双光束设计都是利用参比光路的补偿来减少漂移的影响,结构更为复杂。为了进一步地提高分辨率或降低杂散光,还出现了双单色器分光光度计,其杂散光等性能的确是单单色器分光光度计无法企及的,但其结构的复杂性和制造工艺的高要求也是显然的。

光栅 光栅是分光系统的核心元件,有平面光栅和凹面光栅两种。在制造工艺上,全息光栅已全面取代了刻划光栅。为了提高光能量的利用率,闪耀光栅的使用也很普遍。对于平面光栅,全息技术的长处在于成品率更高,杂散光更小,不产生伪线。而对凹面光栅来说,其迅速的发展几乎全部得益于全息技术的应用。目前,凹面光栅已发展出四种类型^[17]。其中的 IV 型可用于扫描光栅型中。因为兼具色散和聚焦两项功能,使用凹面光栅可以帮助简化扫描光栅型分光光度计的结构。III 型常称为平场型,它能使凹面光栅的像面从通常的罗兰圆变成平面,还可以同时实现消像散的设计。这对于固定光栅的光路不仅是必需的,也使固定光栅型分光光度计的分光系统简约到了极致。

探测器 探测器对分光光度计的设计和性能有着重要的影响^[18]。扫描光栅型分光光度计使用的探测器主要为光电管、光电二极管和光电倍增管等。近十几年来,随着阵列型光电器件技术的发展和运用,促使全新结构和性能的固定光栅型分光光度计的诞生,尤其使分光光度计的测量速度上了一个新的台阶。阵列型光电探测器的典型代表是 PDA 和 CCD,这类探测器测量速度快,多通道同时曝光,最短时间仅在毫秒量级,也可以累积光照,积分时间最长可达几十秒,可探测微弱的信号,动态范围大。另外,由于固定光栅型分光光度计没有机械运动部件,简化了结构,减小了体积,提高了工作的稳定性,使分光光度计能走出实验室,进入工作现场,进行在线测量。

软件 现代分光光度计的软件已不再只是用作数值运算的附属工具,而是整台仪器的核心,渗透到分光光度计的各个层面。特别是那些使用通用 PC 的分光光度计,用户的使用感觉与其说是一台实实在在的仪器,倒不如说是计算机上的一个应用程序。仪器

网络化的趋势将进一步加深这种印象。软件技术也是分析仪器自动化、智能化的关键因素。

软件的作用主要有控制、监测与校正、光谱采集与处理、数据存储与分析等。分光光度计的测量波长或范围的设置、光栅运动的驱动和控制、光源的自动切换、滤光片的自动选择、探测器的驱动、A/D 转换的同步、数据传输至计算机、数据写入内存、光谱或测量结果的显示,所有这些功能对于使用者来说可能只是按下了一个按钮或点击了一次鼠标。软件完成了所有的幕后工作。为了提高仪器的使用性能,在软件中包含了硬件的监测和校正,如光源的输出功率、波长的准确性、杂散光水平、基线校正等。光谱数据的处理和分析更是软件的特长。用户友好的视窗图形界面和菜单操作,光谱图和数据作为文件进行管理、存储和读取,光谱图可随意地移动、放大、缩小、重叠,数据可以被平滑、求导、积分、进行函数运算,可以自动寻找峰值、浓度分析、多组分分析,还可以有多种软件包,如核酸分析、蛋白质分析、动力学分析、水质分析和环保分析等,用于各专业领域。

整机设计 紫外可见分光光度计的整体结构设计可以分成两种。一种是将所有的部件,包括光学系统、探测器、电子学系统、微机系统、显示设备等都包含在一个机壳中。这种设计基本无需配置其它设备,可独立地完成分光光度计的所有功能。为了给用户提供一个方便的操作界面,这些分光光度计大量采用了液晶视频显示,有些还使用了触摸屏。而专业性强的光度计更是尽可能简化按钮操作。不过,为了有利

于数据交流及功能扩充,很多产品都备有 RS232 接口,可以外接记录仪、计算机或与光谱数据站联结,完成仪器遥控、数据传输、外存、记录等功能。配有打印机接口的也相当普遍。另一种的整体结构则是分散式的。最常见的就是将计算机分离出来,使用通用 PC 机,而其它部分仍布置在一个机壳中。这种方式的长处在于可以充分利用通用 PC 机的资源。它的操作系统大多采用 Windows 界面,不论风格还是使用习惯对于今天的用户来说都是很亲切的,大大简化了仪器操作的培训。通过 PC 机,分光光度计可以很容易地进行数据的交流,不仅是在一个工作组中,还可以通过互联网。不仅是数据的访问,远程的设备操作也是可以实现的。进一步,在分散式的基础上还有模块化的布置。这类设计中,各个具备独立功能的系统或部件都可以分离出来,用光缆和电缆相互连接,使用十分灵活。当然,这种可以看到的模块化只是一方面,更广泛的含义是模块化的设计和制造思想。此外,另一项重要的技术就是光纤,光纤使分光光度计的配置更灵活,使用更方便,也是在线测量的实现基础^[19~20]。

3 紫外可见分光光度计的技术性能指标评述

搜集了国内外 37 个厂家的 152 种不同型号紫外可见分光光度计资料,一部分资料是厂家或经销商提供的产品技术性能指标文本资料,绝大部分资料来源于生产厂家以及经销商的网站。

表 1 国内外紫外可见分光光度计技术性能指标情况

	典型	最大	最小	备注
光谱范围 nm	200~1100			
波长准确性 nm	0.1~1	2	0.02 (cary 300)	国产典型 0.3~2
波长重复性 nm	0.1~0.5	1	0.008 (cary100/300)	
分辨率 nm	0.5~6	6	0.05 (cary4000)	上分厂的 760mc 在 0.08~5 可调
扫描速度 nm/min	100~4000	24000(cary50)	24	
光度范围 A	-0.3~3A, 0~5A, 0~2A, $\pm 3A$	$\pm 7A$ (cary 400)		国产最大 $\pm 4A$ (TU1901)
光度准确性 A	0.003~0.005@1A		0.0005@1A(cary6000i)	
光度重复性 A	0.0008~0.002@1 A			
光度范围 T%	0~200			
光度准确性 T%	0.3~0.5@0~100 %			国产典型 0.3~0.5
光度噪声 A	0.002pp, 0.0005 rms, @0A		0.00003@0A	
杂散光 T%	0.01~0.05 % @340nm	0.5 % @220nm	0.00008 % @370nm(cary 100/ 300 /400)	国产典型 0.2~0.5 %
基线平直度 A		0.001~0.005		
基线稳定性 A/h	0.001~0.004A/h@0A, 340nm		0.0001A/h@0A, 340nm	
光源	氘灯+钨灯 92 种, 氘灯 14 种, 钨灯+紫光二极管 1 种, 氘灯+氘灯 1 种, 不详 17 种, (国外)			
探测器(国外)	CCD 或 PDA26 种, 光电二极管 52 种, PMT23 种, 不详 24 种, (国外)			
光学设计与单色器	固定光栅 26 种, 扫描光栅 90 种, 滤光片 1 种, 不详 8 种。(国外) 双光束 37 种, 双单色器 8 种, C-T 型 11 种, Littrow 型 7 种, Seya Namioka 型 3 种			

国外的厂家及型号主要有:Perkin Elmer Instruments (PE)的 Lambda 系列, Varian Analytical Instruments (瓦里安)的 Cary 系列, Beckman Coulter Inc(贝克曼)的 DU 系列, Hitachi Instruments Inc(日立)的 U3 系列, Shimadzu Scientific Instruments (岛津)的 UV 系列、MS、PharmaSpec 及 Bio 系列, Jasco Corp Ltd 的 V 系列, Agilent Technologies(安捷伦)的 HP 系列, OceanOptics(海洋光学)的 S 系列、USB2000 及 PC2000, Amersham Pharmacia Biotech 的 Ultrospec pro 系列, Spectronic Unicam (即 Thermo Spectronic)的 Genesys 系列、UV 系列及 Nicolet Evolution 系列, Aurora Instruments Ltd 的 UV 系列, GBC Scientific Equipment Ltd 的 Cintra 系列, Bio-Tek 的 PowerWave 系列, Hach 的 DR 列, Cecil Instruments Ltd. 的 1/2/3/4000 系列、7200、9200 及 Aurius、Aquarius 系列, Labomed Inc 的 UVS、UVD 系列, Cam-spec Scientific Instruments 的 M 系 Scinco CO. Ltd 的 S 系列, Sherwood Scientific Ltd 的 320, Spectral Instruments Inc 的 420/440, Jenway Techne Inc 的 6*05 系列, Stellar-Net Inc 的 EPP2000, 此外, 还包括 Turner Designs Inc.、World Precision Inst.、Bestech Instruments、Secomam、Molecular Devices Corp 等等。国内的产品主要有上海分析仪器总厂的 75 和 76 系列、上海棱光的 S51/2/3/4、天美科学仪器有限公司 8500、北京普析通用仪器公司 TU-系列、北京瑞利分析仪器公司 UV1/9100 系列、天津光学仪器厂的 WFZ 系列等等。

综合分析和比较各种型号紫外可见分光光度计的技术性能指标, 概括如表 1。结合该表, 对各紫外可见分光光度计的性能指标进一步作简单评述。

光谱范围 紫外可见光谱区通常指 190nm~780nm 的波长范围, 但实际的分光光度计设计中, 经常将波长向长波方向拓展, 进入短波近红外区。在 120 多种国外产品中, 有 52 种波长 $\leq 900\text{nm}$, 其中 $\leq 800\text{nm}$ 的仅 11 种。而 $> 900\text{nm}$ 的有 72 种, 占了多数。固定光栅型受硅阵列探测器的限制, 1100nm 是其波长的上限。扫描光栅型使用分立光电器件, 波长的扩展更为灵活。最特殊的是 Varian 的 Cary6000i (175~1800nm)、Shimadzu 的 UV3101PC (190~3200nm) 和 Jasco 的 V-570 (190~2500nm), 通过切换光栅和探测元件, 使仪器的光谱范围覆盖了紫外、可见和近红外区, 可满足一机多用的需要。

波长的准确性 仅有 16 种偏差超过 1nm, 其余大多在 0.1~1 之间。其中突出的是 Varian 的 Cary100/300, 它们在 656.1nm 处的波长准确性达到了 0.02nm 的水平。波长重复性大于 0.5nm 的仅 7 种, 0.1~0.5nm 之间的占了多数, 共有 68 种, 还有相当数

量的产品达到了优于 0.1nm 的水平。如 Agilent 的 8453 (0.02)、Beckman 的 DU7000series (0.05)、Camspec 的 M400T/PC (0.05)、GBC 的 Centra10/20/40 (0.04)、Hitachi 的 U3010/3310 (0.05)、Perkin Elmer 的 Lambda 系列 (0.02~0.05)、Scinco CO 的 S-1100/3130/3150 (0.02)、Shimadzu 的 MS1500 (0.01) 和 UV1201 (0.03)、Varian 的 Cary 系列 (0.008~0.025) 等。虽然从原理上, 固定光栅型的设计结构固定、简单, 易于实现好的波长准确性和重复性, 但扫描光栅的设计制造工艺已十分成熟, 从性能指标看, 最突出的 Cary 系列、Lambda 系列都是扫描光栅型的产品。

分辨率 扫描光栅型通过改变狭缝宽度可选择分辨率, Varian 的 Cary4000 最高做到了 0.05nm, 上海分析仪器总厂的 760mc 也可达到 0.08nm。固定光栅型受到阵列探测器的长度和像元数量限制, 除非光谱范围很窄, 否则分辨率是很难高于 0.1nm 量级的。

扫描速率 大多在 100~4000nm/min, Varian 的 Cary50 最高实现了 24000nm/min, Cary4000 也有 20000nm/min。但与固定光栅型最短 ms 量级完成全光谱测量的速度相比, 仍是较慢的。

吸光度 普遍可达到 2~3A 的水平, 共有 80 种产品最大光度值在 2~3A 之间, 另有 28 种产品可以量测超过 3A 的样品。其中, 最高的是 Varian 的 Cary4000, 达到了 7A。其余, 如 Spectronic Unicam (Thermo Spectronic) 的 Nicolet Evolution300/500 和 UV510/520 (6A)、Shimadzu 的 UV2401/2501/310 PC (5A)、Jasco 的 V550/560、GBC 的 Centra5/10/20/40 (5A) 等也有很高的水平。

杂散光 典型值是 0.01~0.05%T, 在国外的产品中共有 65 种产品的杂散光指标在这一范围中。杂散光超过 0.05%T 的产品有 31 种, 小于 0.01%T 的产品有 19 种。其中, 最为突出的是 Varian 的 Cary4000/6000i 和 Shimadzu 的 UV3101PC, 它们的杂散光水平达到了令人惊讶的 0.00008%T。从其光学设计看, 都采用了双单色器。与扫描光栅型产品相比, 固定光栅的分光光度计少了出射狭缝, 实现低杂散光的难度更大。从性能指标来看, 范围是 0.01~1%T。26 种固定光栅型产品中杂散光在 0.01~0.05%T 之间的有 13 种, 也已达半数, 但是能够低于 0.01%T 的很少。

我国的紫外可见分光光度计, 性能指标总体上接近国外的中等水平, 缺少高档产品。考察 6 家国内企业的 27 种产品的主要技术指标。波长准确性, 国外的典型水平是 0.1~1nm。国内产品中, 处于此范围的有 16 种, 基本达到同一水平, 但没有优于 0.1nm 的产品。国内产品的光度准确性大多以透过率表示, 水

平比较接近,均在 0.3~0.5%T 之间。在 10%T 处,也就是吸光度为 1A 处,将光度准确性以吸光度表示,则数值为 0.013~0.021A。与国外产品有比较明显的差距。国内产品的光度重复性基本在 0.1~0.3%T 范围,同样在吸光度 1A 处换算,数值为 0.004~0.013A,也存在距离。比较国外与国内产品的杂散光的典型值,两者几乎相差了一个数量级。但是已有一些较新研发的产品,可以达到国外产品的普遍水准。例如北京瑞利分析仪器公司的 UV2100(0.05T%)、北京普析通用仪器有限责任公司的 TU-1901(0.02T%)、上海分析仪器总厂的 761crt(0.03T%)。基线稳定性方面,国产分光光度计与国外产品基本持平。但是,有些国内产品给出此项指标时,标明的测试时间仅为 30 或 15 分钟。从这些基本指标的比较来看,国产紫外可见分光光度计的准确性和可靠性仍然是有待提高的。另一方面,在仪器的控制、操作,数据的显示、处理、分析上,国内产品表现出迅速向国外产品靠拢的趋势。以功能更强的内置微机或外接 PC 取代单片机,利用外接 PC 的显示器或采用大面积 LCD 代替简单的 LED 数字显示,提升软件水平。在此基础上,分光光度计可具有开机自检、波长自动校正、基线自动记忆等功能;配备有更友好界面的操作软件,能够以文件形式存取光谱,显示光谱曲线,可对图形作扩展、压缩、求导、平滑、寻峰等处理;可完成单波长或多波长的定量、动力学等分析。在 6 个国内厂家的产品中都已出现了此类分光光度计。目前,我国的紫外可见分光光度计至少在以下三个方面存在比较明显的滞后。一是高档的科学分析型产品。能够满足精密的科学研究的很少,采用双单色器,具有突出性能的国产分光光度计基本是空白。二是阵列探测器的应用。我国的产品仍以扫描光栅型为主,采用阵列探测器的固定光栅型分光光度计虽然已经起步^[21~22],但进入市场的仍然罕见。三是光纤的使用。市场上以光纤探头取代传统样品室的设计,或可选择外接光纤附件的国产紫外可见分光光度计十分缺乏。

4 结 论

紫外可见分光光度计虽然是一类有着很长历史的分析仪器,但每一次吸收了新的技术成果都使它焕发出新的活力。扫描光栅型分光光度计依托成熟的设计制造工艺,并结合计算机控制等新的技术成果,仍有很强的生命力。在很多方面,扫描型产品仍代表了最高的技术水平。阵列式探测器的产生直接促成了固定光栅分光光度计的设计,使得它在测量地更

快、更稳定、适应性更强的方向迈出了一大步。并且,从今后的发展来看,仪器的小型化、在线化,测量的现场化、实时化将是一大大方向。要使分光光度计走出实验室,成为一种应用更广,更为普及的测量分析设备,阵列式探测器以及其它的固态式设计可发挥重要的作用。光纤也将是其中的一项重要技术,它已使得紫外可见分光光度计的使用变得更方便,同时也使分光光度计的配置变得更灵活。光纤结合模块化设计,可能使得分光光度计可以突破完全固定、静态的组成,而变成可以自由搭配,自助式构建的仪器。光纤同时也是实现在线测量的重要手段。计算机技术的影响将更为增进。分光光度计的自动化、智能化是一个方面。另一方面,软件已经在一定程度上使实在的仪器接近了虚拟的程序,网络和信息技术的结合可能带来进一步的影响。除了传统的空间色散的分光方式,声光调制滤波和傅立叶变换光谱也以其各自的特点表现出了在紫外可见波段的应用潜力。

参考文献

- [1] 王大珩,胡柏顺. 加速发展我国现代仪器事业,现代科学仪器,2000,(3):3~6
- [2] 金钦汉. 分析仪器发展趋势展望,中国工程科学,2001,3(1):85~88
- [3] Owen A. J. The Diode-array Advantage in UV/Visible Spectroscopy, Printed in the Fedetal Republic of Germany 03/88, Publication No. 12-5954-8912
- [4] Spectrometers, <http://www.oceanoptics.com/products/spectrometers.asp>
- [5] Yee G. M., Maluf N. I., Hing P. A., et al. Miniature Spectrometers for Biochemical Analysis, Sensors and Actuators A, 1997, 58:61~66
- [6] Kwa T. A., Sarro P. M., Member, IEEE, et al. Backside-Illuminated Silicon Photodiode Array for an Integrated Spectrometer, IEEE Transactions on Electron Devices, May 1997, 44(5):761~765
- [7] Correia J. H., Bartek M., Member, IEEE, et al. High-selectivity Single-chip Spectrometer in Silicon for Operation at Visible Part of the Spectrum, IEEE Transactions on Electron Devices, March 2000, 47(3):553~559
- [8] 温志渝,陈刚,温中泉等. 混合集成微型光纤光谱仪的设计模拟及实验,光学学报,2003,23(6):740~744
- [9] 何清义,温志渝,袁祥辉等. 多道成像光谱探测阵列的研究,仪器仪表学报,1999,20(2):148~151
- [10] 胡松,温志渝,陈伟民等. 一种新型微小型光谱仪的设计,压电与声光,2000,22(6):363~366
- [11] Jouko M., Markku K.. LED-based Spectrometer Modules for Hand-held Sensors and On-line Process Monitoring, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1999, 3537:88~95
- [12] 何嘉耀,彭荣飞,张展霞. AOIF 在光谱分析中的应用研究 1. AOIF 可见分光光度计的硬件和软件设计,光谱学与光谱分析,2002,22(1):67~70

(下转第 11 页)

发展情况我们将另文介绍。

参考文献

- [1] 朱果逸, 张月霞. 国外电化学分析仪器进展. 现代科学仪器, 1992, (2): 19~21
- [2] 杨连喜, 常旭晋, 李进, 钱俊峰. CMBP-1 型双恒电位仪的研制. 化学传感器, 1992, 12(4): 49~51
- [3] 费锡明, 方麟倡. 集成电路恒电位仪. 中南民族学院学报. 1982, (1): 25~28
- [4] 姜远达, 许传经, 胡绍铭, 周道民, 章宗耀. SIU-101 恒电位仪研制. 第五届全国电化学会议论文集. 济南, 1989. 1B08
- [5] 李忠义, 冯业铭. HPD-1 型恒电位仪研制. 第六届全国电化学会议论文摘要集. 天津, 1991, D77
- [6] 李忠义, 冯业铭. 402 型双参比恒电位仪研制. 第六届全国电化学会议论文摘要集. 天津, 1991, D76
- [7] 施业澎, 朱明俊, 李进, 李继军, 钱俊峰. CMEM-1 型电化学常用测试仪. 分析仪器, 1993, (12): 39~41
- [8] 周凤林, 龚建荣, 王永生. NY-1 电化学 C-V 自动测试仪的研制. 电子测量与仪器学报, 1992, 6(2): 27~34
- [9] 纪华民, 汪尔康. 多功能高灵敏度双恒电位仪的研制及应用. 分析化学, 1991, 19(8): 976~980
- [10] 钱忠仁, 王少年, 晏双龙, 徐小海. CH-1 型恒电位仪的研制与应用. 分析仪器, 1999, 12(9): 33~34
- [11] 裘民洲. 数字式直流示波极谱仪. 分析仪器, 1990, (3): 28~31
- [12] 吕民达, 陈抒平, 沈观略. JP-2 型示波极谱仪的微机控制系统. 分析测试仪器通讯, 4(2): 11~13
- [13] 龚学贤. 采用单板计算机控制的方波极谱分析仪. 上海海运学院学报, 1989, (4): 70~75
- [14] 蒋敦斌, 付植桐. MC98-A 型多功能极谱仪研制. 分析测试技术与仪器, 1995, 1(3): 2~6
- [15] 李申, 张溪, 宋义民. CP-A 型微机极谱仪的研制. 齐齐哈尔师范学院学报(自然科学版), 1995, 15(4): 19~21
- [16] 晏双龙, 王少年. XJP-20 型新极谱仪的研制. 分析仪器, 1999, (4): 30~32
- [17] 李培标, 刘清, 赵藻藩. 微机化多功能电位溶出分析仪. 第三届全国计算机化学学术报告会议论文集. 杭州, 1990. 255~256
- [18] 于景阳, 田景芝, 倪世忠. SV-2.0 微机电极溶出仪的研制. 齐齐哈尔轻工学院学报, 1996, 12(3): 68~71
- [19] 李华清, 黄慧萍, 俞国柱. MP-2 型溶出分析仪联机接口软硬件的设计. 分析仪器, 2002, (2): 18~20
- [20] 吴志军, 刘清, 赵藻藩. 微机化的计时库仑仪. 第三届全国计算机化学学术报告会议论文集. 杭州, 1990. 253~254
- [21] 毛英, 李毅, 金洁. XHX-1 型便携式电化学分析仪. 地质仪器, 1996, (4): 29~34
- [22] 许荣达, 洪丽娟, 陈庆纲, 杨孙楷. 微机化多功能电化学分析仪的研制. 分析仪器, 1990, (2): 35~39
- [23] 于庆泽, 周政普. 微机电化学测试分析系统. 大连铁道学院学报, 1993, 14(3): 81~84
- [24] 隋青美, 杨连喜, 王志定. 微机自动控制电化学测试系统的研制. 山东工业大学学报, 1994, 24(4): 336~340
- [25] 贺荫南. MEC-12A 多功能微机电化学分析仪在环境分析中的应用. 株冶科技, 1994, 22(1): 52~57
- [26] 冯业铭, 党红社, 林海潮. 智能电化学分析系统的研究. 中国矿业大学学报, 1996, 25(4): 63~67
- [27] 蒋敦斌, 付植桐. 智能电化学综合测试仪. 化工自动化及仪表, 1997, 24(3): 42~47
- [28] 姜学国, 晏双龙, 常旭晋, 杨连喜, 钱忠仁, 李红文. MEC-II 型微机电化学分析仪的研制. 化学传感器, 1999, 19(1): 67~71
- [29] 周红, 董献堆, 夏勇, 朱果逸. 综合电化学分析系统的研制. 分析仪器, 2000, (4): 9~13
- [30] 朱迎春. 铜缓蚀剂的筛选研究—MEC-12A 多功能微机电化学分析仪的应用. 化学传感器, 1990, 10(3): 55~60
- [31] 于俊生, 张祖训. 计算机化的多功能超微电极电化学仪器. 高等学校化学学报, 1992, 13(7): 902~905
- [32] 许立名, 董泽华. 计算机控制的腐蚀电化学测量与分析系统的研制. 计算机与应用化学, 1996, 13(1): 60~64
- [33] 林广, 王建明, 张鉴清, 乔亦男, 曹楚南. 电化学暂态联机测试. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(4): 237~239
- [34] 张小武, 胡细东, 姚禄安, 鲁智智, 黄绍元, 周国强, 李锂, 皮斌. 交流阻抗微处理机测量系统. 中国发明专利, CN86105986A, 1986
- [35] 董泽华, 刘宏芳, 许立铭. 基于高速数据采集的阻抗测试. 计算机与应用化学, 1998, 15(6): 60~64
- [36] 徐和春, 黄瀛洲. 一种高精度测量阻抗实部的新方法. 浙江丝绸工学院学报, 1994, 11(3): 25~30
- [37] 邓兆祥, 林祥钦. 基于 AD829 运算放大器的超快伏安系统. 分析化学, 2003, 31(10): 33~35

(上接第 7 页)

- [13] 彭荣飞, 何嘉耀, 张展霞. AOIF 在光谱分析中的应用研究 2. 自装 AOIF 可见分光光度计的应用. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(1): 71~74
- [14] Tran C.D., Lu Jian. Characterization of the Acousto-optic Tunable Filter for the Ultraviolet and Visible Regions and Development of an Acousto-optic Tunable Filter Based Rapid Scanning Detector for High-performance Liquid Chromatography, Analytica Chimica Acta, 1995, 314: 57~66
- [15] 何锡文, 陈鼎, 杨万龙等. 傅立叶变换技术在紫外可见光谱区的应用. 分析化学, 1994, 22(1): 94~100
- [16] L2D2 LAMPS, <http://www.hpk.co.jp/eng/products/ETD/l2d2e/l2d2e.htm>
- [17] 包学诚, 陈怀安. 新型全息凹面光栅的研制与光谱仪器的发展. 现代科学仪器, 1994, (4): 26~28
- [18] 李昌厚, 孙吟秋. 略论光谱仪器中的光电技术及其发展. 光学仪器, 1990, 12(4): 40~44
- [19] Wei J.B., Shaw B.D., Xiao J.S. Transient Measurements of the Composition of Evaporating Droplets by Fiber Optic Absorption Spectroscopy, Optics and Lasers in Engineering, January 2003, 39(1): 91~108
- [20] Johansson J., Cauchi M., Sundgren M. Multiple Fiber-optic Dual-beam UV/VIS System with Application to Dissolution Testing, Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2002, 29: 469~476
- [21] 曾延安, 梁荫中. CCD 在光谱分析系统中的应用研究. 光学技术, 1998(4): 3~4
- [22] 郝学元, 季鑫源, 陈家胜. 用线阵 CCD 实现光谱测试的虚拟仪器. 光学仪器, 2001, 23(3): 3~6