

滤纸微流控设备集成电化学检测

唐帆^{1,2}, 邢宏龙¹, 毕莲花², 郑虎祥², 王伟²

(1. 安徽理工大学 化学工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 盐城工学院 化学与生物工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:近年来,人们发现滤纸微流控设备相比于传统的微流控设备来说具有一次性使用、制作简单且成本更低的优点。简单综述了微流控设备的发展现状以及滤纸和电化学检测的相关特点,着重阐明了滤纸在微流控电化学检测中的应用,同时与商品化的检测仪相结合,为微流控设备未来商品化打下了坚实的基础。

关键词:一次性微流控设备;滤纸;电化学检测;实时现场分析;综述

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2012)02-0060-06

随着半导体集成电路、微细加工技术和超精密机械加工技术的进步,渐渐涌现出许多新概率和新研究方向,如微光机电系统、生物芯片、微全分析系统(Micro Total Analysis Systems, μ TAS)等^[1],以微流控设备^[2]为代表的现代分析仪器因其成本低、体积小、使用方便、试剂用量少、分析快速等突出优点引起了广大科研人员的关注和研究。

1 微流控设备的发展现状

微全分析系统(μ TAS),又简称为芯片实验室(Lab-on-a-chip),是基于分析化学、分析生物化学方法以及微机电加工技术,在微芯片上构建出可完成传统实验室中样品的制备、混合反应、分离和检测等功能的平台,建立了以计算机科学、电子学、材料科学、生物学等众多领域交叉的化学分析系统,从而实现原本在常规实验室中的试样处理到检测的整体微型化、自动化、集成化与便携化。其中微流控分析(Microfluidic Analysis)是微型全分析系统的主要组成部分,而微流控设备是在微流控分析技术的支撑下发展的产物即通过将具有微通道结构的传输介质(如滤纸、微芯片等)集成相应的三电极(如商品化的丝网印刷电极(SPCE)等)制作而成并且结合相应的检测器(如电化学工作站等),可被广泛应用于环境监测、医疗诊断、食品安全分析等领域^[3-7]。

多数便携式电化学检测仪是由低成本微流控

设备商品化而来。便携式电化学检测仪是主要由动力源(电源)、检测器(电化学检测器)以及微流控设备3部分组成。传统的便携式血糖检测是低成本微流控设备中最先商品化的,是一种常见的便携式电化学检测仪,它需要间断性手指刺针来检测血糖。近年来出现了一种手表式血糖仪,该血糖仪是一种无创、无痛、可以连续测定血糖的微流控设备。它可以给糖尿病患者提供13 h的连续检测,在反映血糖变化趋势上具有很大的优势。Abbott i-STAT手持式电化学临床血液分析仪在血糖仪的基础上发展而来,是由美国雅培制药有限公司开发出的,它具有试剂消耗少(除测试片外无需其它消耗品并且采集少量血液在无需抗凝剂的情况下进行全血检测)、操作快速简便(无需分离血浆和血清、3 min可获取结果且普通人即可完成操作)等特点,可以方便快速检测血气参数、电解质、凝集分析、血液学分析、血糖、心脏标志物等各种人体健康指标。

鉴于便携式电化学检测仪在未来将有很大的发展前景,现阶段国内外很多科研人员正着手对其进行研究。一种方向是将电化学检测方法与其它分析手段(如色谱等)联用,研究出具备二者的双重优点的联用便携式电化学检测仪。另一种方向是充分利用微流控设备微型化的特点,结合其核心部件微通道,研究出基于微流控设备的便携式电化学检测仪。在国际上,Barton课题组则研

收稿日期:2011-04-01

作者简介:唐帆(1987-),男,江苏南京人,硕士生,主要研究方向为微全分析,电化学检测。

究出了基于 DNA 修饰电极的芯片检测仪。利用该检测仪可以实现对 DNA 中各类碱基错配的快速灵敏检测。在国内,西安瑞迈分析仪器有限公司则开发出了 MPI-M 型微流控芯片电化学检测仪-电化学分析仪。该仪器将传统的实验室中的样品分离、检测集成在其内部进行。

2 滤纸及电化学检测的特点

从滤纸的结构上来看,大部分滤纸多由纤维(植物纤维和其它各种纤维)交织而成。同时各种纤维之间互错而形成许多小孔,因此对气体或液体具有良好的通透性,从而其可用于对空气或者水溶液中的固体颗粒进行过滤;滤纸的表面化学性质决定了生物分子可在其表面吸附固定且非特异性结合,联酶反应时显色;其光学性质决定了滤纸在颜色或者荧光反应时的应用,例如某些商业化的特殊纸张是经过荧光物质(光学光亮剂)处理,该纸张在荧光检测中可以作为很好的背景;由于其内部具有丰富的毛细管,吸载本身质量 20%~100% 的液体,可以用于存储试剂,也特别适合在其上进行有颜色变化的微型实验,同时它在纸层析中被作为惰性载体来分离复杂样品中的微量物质。除此之外,滤纸还可以用于吸除钾、钠表面的煤油,用作载体进行焰色反应,用做叠层式原电池实验,用于进行各种喷雾显色反应等。滤纸的这些特点应用于制造微流控设备,很大程度上解决了微流控设备的试剂存储、流体流动驱动力等问题,而且它本身成本低、便携且可一次性使用,恰好符合现代分析科学和分析仪器的微型化、自动化、集成化与便携化的发展趋势。

电化学检测方法是作为电极作为传感器,实现将溶液中的待测组分的化学信号转变为电信号来对待测物质进行检测的方法。近年来,伴随着微流控芯片而延伸出来的滤纸微流控设备得到较快的发展,同时电化学检测限不会随着待测样品的体积减小而减小,同时在滤纸微流控设备中,电化学检测仪器的微型化、集成化也得到了快速发展。电化学检测具有仪器简单、分析费用低、便携、高灵敏度和高选择性等优点。与其他检测器相比,电化学检测仪因其体积小、装置简单而更符合检测系统微型化、集成化的要求。也正是因为这些优点,电化学检测才可以方便地与滤纸微流控设备结合起来用于待测物质的分离及检测。电化学方法与微流控设备相结合的最为经典的商品

化的设备即是日常生活中所应用到的手持式血糖仪。近几年来,微型高度集成电极得到了快速发展,如丝网印刷电极(SPCE)进一步地突出了电化学检测的各种优点,这更加利于促进便携式和微型化检测器的快速发展。

3 滤纸应用于微流控电化学检测

微流控设备的发展至少在某种程度上受到现代社会对低成本面向现场的医疗诊断和环境监测设备^[8,9]需求的推动作用。对于面向现场的应用,该设备的目标是将待测样品从设备的一端注入到设备中而设备的另一端得出相应的检测结果即“样品进,结果出”,以此为依据来解决社会发展过程中遇到的问题。近期许多科研工作者着手将滤纸引入到微流控设备中即以滤纸作为微流控设备的基底材料,它对于取代传统的以玻璃或者聚合物为基底的微流控设备用于面向现场检测更具有一定的潜力,其原因是它具有使用简单、成本低、消耗试剂和样品量少、可提供快速分析、一次性使用、由可再生基底材料制作并且便携等特点。

3.1 滤纸上印刷电极实施电化学检测

过去数年在滤纸上印刷电极对待测物实施检测大多采用比色法作为检测手段,其缺点是匹配的颜色与肉眼观察到的颜色容易受到很多因素干扰,如每个人对颜色的视觉感知不同、光线的强弱、标签上的干印刷颜色与在滤纸上反应产生的颜色(如湿的)存在一定的差异,这对检测结果的准确性将造成极大的影响。后来,尽管为了弥补这一主观感知所造成的误差而选用照相机和手提式扫描仪来记录颜色的强度,但受到照明条件和使用的已知标准颜色的校准曲线的影响,最终得出的检测结果在一定程度上还无法满足于某些领域的需求。

针对这一问题,Dungchai 等^[10]将先前报道光刻法用于图案化的 Whatman No. 1 滤纸上^[11,12],将疏水性检测区域和三电极丝网印刷在滤纸上,运用电化学方法来同时检测生物样品中的葡萄糖、乳酸以及尿酸。其滤纸印刷设备的制作过程为:将 SU-8 3025 光刻胶倾倒在滤纸中央,用涂层器将其在滤纸上均匀的铺展开来,并将该滤纸置于 95 °C 的环境下烘烤大约 10 min。然后将用标准的激光打印机产生的透明的薄膜光罩覆盖在该滤纸上,并且用紫外灯照射。将其置于 95 °C 的环境中烘烤 1~3 min 后,通过将该滤纸浸入到丙

酮溶液 1 min 来除去滤纸表面未聚合的光刻胶,并将滤纸置于清水中除去其表面的丙酮。接着,将该滤纸置于室温条件下干燥 1 h 即可完成检测区域的印刷。在每次使用之前,需将其暴露于空气等离子体(Harrick PDC-32G)中处理 30 min。其中覆盖光刻胶的区域保持疏水性,其它区域保持亲水性。三电极在滤纸上的印刷是将所有电极的工作部分印刷在滤纸的亲水性部分,接触衬垫印刷在滤纸疏水性区域,其中丝网印刷分两层:一层是用 Ag/AgCl 印刷充当衬垫和参比电极,另一种是含有普鲁士蓝(PB)(为了提高对 H_2O_2 检测的选择性,采用了普鲁士蓝(PB)对电极进行修饰)的碳印刷充当工作电极和辅助电极。随后将其置于 65 °C 下固化 30 min,并在室温条件下冷却。

在使用该滤纸印刷设备来检测生物样品中的待测物之前,研究者运用了循环伏安法来验证印刷在滤纸上电极的检测功能以及滤纸上检测区域上的分离功能。实验结果表明,扫速在 $2.5 \sim 100 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,检测得出的阳极和阴极的峰电流与扫速的平方根成线性关系,但正向和反向的斜率与传统电极材料的有所不同。这种不同可能是由于在湿电极表面使用受限氧化还原剂(PB)以及预期的碳电极非理想电化学行为共同作用的结果^[13]。同时还对检测过氧化氢所需设置的最佳电压进行了优化,在最优的电压下运用安培检测法分别对不同浓度葡萄糖、乳酸和尿酸进行检测,得到这 3 种物质的校准曲线,经研究发现得到的检出限和定量限比传统检测方法得出的要低,完全能够满足于检测人体血液或者尿液中的葡萄糖、乳酸和尿酸的需求。为了能够验证该电化学滤纸微流控系统能否用于实际样品的检测,研究者随后还选用合适的酶来修饰电极将其用于对血清样品中的小分子标志物如葡萄糖和酒精进行了检测,将检测结果与标准结果相比较,发现该滤纸微流控设备的检测结果与标准结果非常接近。虽然无法直接检测实际血清样品中的尿酸,但通过加标回收实验也同样能够得到较准确的结果。经以上实验可以看出对于同一种样品来说,利用滤纸微流控设备得出的实验结果在传统临床诊断分析结果的误差之内。因此,该设备未来对各领域检测将具有很大的发展前景。

3.2 滤纸作为传输载体集成丝网印刷电极实施电化学检测

滤纸是在化学和生物实验室里的常用材料之

一,大部分滤纸的主要成分为棉质纤维,其内部具有许多毛细管以及其表面有许多基团,故它本身具有多种性质(如吸水性、传输作用、过滤作用、分离作用等等)。Nie 等^[14]利用滤纸的传输作用、毛细作用且通过蜡印刷或者激光打印技术处理滤纸构建出滤纸微通道,利用双面胶将其与自制的三电极(在滤纸或者聚酯薄膜上通过丝网印刷碳作为工作电极和辅助电极,Ag/AgCl 作为参比电极)结合,制作出微流控设备并结合电化学检测方法即安培检测法和方波阳极溶出伏安法,实现了对尿液中的葡萄糖和水溶液中的重金属铅的检测。首先,研究者运用循环伏安法对自制电极进行了验证,从循环伏安峰的形状可以看出在该电极表面呈现出可逆的电化学反应,故不会发生副反应,表明该电极可用于检测待测样品。此后研究者分别对实际尿液中的葡萄糖和水溶液中的重金属铅的检测,并得出较为准确的检测结果。同时研究者发现该设备用于检测尿液中的葡萄糖在临床检测浓度范围内显示出很高的灵敏度和准确性。该设备对葡萄糖的检测限大约 0.22 mM (相当于 $4 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$),低于传之前报道传统血糖仪^[15]和比色检测法^[16]的检测限。运用该设备对水溶液的铅进行检测,在进行阳极溶出伏安法检测的过程中,主要依据滤纸连续的毛细作用带动样品溶液穿越电极表面来增加金属在电极表面的沉积效率,以此来提高其灵敏度和检测能力。该设备对铅的检测限达到 1.0 ngg^{-1} ,低于世界卫生组织(WHO)对饮用水中铅的安全水平的规定值($< 10 \text{ ngg}^{-1}$)。经研究发现该微流控设备最大的优点在于在无需任何外部手段的情况下,只需滤纸的毛细作用即可实现对流体的传输。同时我们课题组^[17,18]利用滤纸的吸水性提出了运用滤纸存储试剂集成丝网印刷电极制成一步传感微流控设备结合电化学检测方法来实现对重金属铅的检测,并且运用了内标法来对检测结果进行校准,得出的结果灵敏度高且重现性也较好。该方法的优势在于可将检测所需的试剂预先存储在滤纸上,特别适合用于实时现场检测,避免了试剂携带的麻烦,同时运用内标法促使检测更加快速且得出的检测结果更加准确。Carvalho 等^[19]主要利用滤纸的分离作用报道了一种纸基分离微流控设备用于分离电化学检测混合物中的尿酸和抗坏血酸,能实现对待测物的快速检测且得出的检测结果较为准确。这种方法对于检测在溶剂中有不同

的溶解度和对滤纸纤维的吸附作用的不同的待测物质具有很大的优势,对于受污染的样品同样能够得出较准确的检测结果。

3.3 滤纸作为传输及反应载体集成丝网印刷电极集成实施电致化学发光检测

近些年来,电致化学发光(ECL)即化学发光反应自我发起且受到电化学电压的控制,在分析化学中的重要性日益增长^[20-24]。ECL因结合化学发光和电化学技术二者的优点以及提供了额外的选择性而成为一种很有吸引力的检测方法。其发光反应在时间和空间上受到紧紧地控制,由于不易受到背景干扰,故其具有较高的检测灵敏度。

Delaney等^[25]首先提出了将基于ECL传感运用于滤纸微流控传感器中。利用传统的喷墨印刷微流体基底,然后将其切割下来,其亲水性部分存储Ru(bpy)₃²⁺溶液,干燥后,用透明塑胶将滤纸微流体基底固定在丝网印刷电极上,从而构造出低成本、一次性使用的ECL传感器。首先利用循环伏安法来验证Ru(bpy)₃²⁺溶液在滤纸上的电化学响应,结果发现响应值不受滤纸的影响,这与Nie等^[14]所报道的溶液在滤纸上的检测信号比自由溶液的检测信号低30%有一定的差异,可能是不同滤纸纤维密度的差异所引起的。同时研究者还运用共反应物2-(二丁氨基)-乙醇(DBAE)作为分析物模型来验证该滤纸微流控设备可用于电致化学发光检测。用光电倍增管作为光电探测器得出DBAE浓度在3 μM~5 mM范围内与响应信号成线性关系,检测限达到0.9 μM,对烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)的检测限达到72 μM,能够用来对NADH定量则可以将其与酶催化的底物如酒精、葡萄糖及乳酸等联系起来。基于Whitesides等^[26]等提出内置摄像头的手机相比光电探测器来说比较普遍、使用简单且方便随身携带,同时能够有效的用于比色法检测。研究者提出利用内置摄像头的手机来读取电致化学发光产生的信号。其过程:当一滴样品通过塑胶孔引入到滤纸微通道中,经过滤纸的毛细作用,样品溶液到达检测区域,当检测区域完全润湿时,便于存储试剂发生反应发出光,可利用光电探测器或者内置摄像头的手机来读取。更为重要的,由于ECL是在黑暗的环境中发生,故不会像比色检测那样

易受到环境光线的影响。

3.4 滤纸作为传输及反应载体集成手持式商品化的电化学检测器

Whitesides课题组^[14]和其他课题组^[27-29]开发出了可以对水溶液中的许多物质(如葡萄糖、酶、血清蛋白以及重金属离子)进行定量分析的滤纸微流控电化学设备。尽管电化学在很大程度上提供了一套强有力的分析方法,但是应用于研究、工业和临床检验的多种电化学设备太过于昂贵和笨重而无法用于资源受限的实际环境中去。现社会上使用越来越多的血糖仪将为电化学从实验室使用转变为实际环境中的现场使用建立了一座桥梁。血糖仪中使用到的商品化的电化学葡萄糖测试试纸条主要是以塑料为基底,在美国其价格(包括利润)大约每片0.5~1.0美元,这使得它在发展中国家广泛使用是不现实的。

Nie等^[30]则提出了将简单的电化学微滤纸分析设备(E_μPADs)与商品化的血糖仪相结合,实现了对血液或者尿液中与人类健康相关的多种物质(如葡萄糖、胆固醇、乳酸和酒精)快速进行定量电化学分析。该电化学设备起到了液体处理和支撑传感电极的作用。血糖仪相当于安培计,可以测量测试条中存储的试剂与葡萄糖反应产生的电活性物质的流量^[31]。该设备包括通过蜡印刷和丝网印刷在色谱滤纸上的微通道、电极和有关电的连接线。研究者为了验证该分析设备与商品化的血糖仪的兼容性,利用其与血糖仪结合检测人体血液中的葡萄糖,得出的人体血液中葡萄糖浓度在0~500 mg·dL⁻¹范围内,葡萄糖的浓度与响应峰电流的线性校准曲线与商品化的测试条的结果相比较比较接近,同时还将其应用于检测人体血液中的胆固醇、L-乳酸和水溶液中的酒精。其过程:在使用之前,通常将干的E_μPADs插入血糖仪通道中。当滴一滴液体到E_μPADs暴露的一端后,滤纸的毛细作用促使包含有待测物的液体进入其传感区域,于是与存储试剂发生反应,产生的电活性物质被血糖仪检测出,结果由其液晶显示屏中读出。该设备具有操作简单、快速(<60 s即可完成一次检测)并且低成本(在当前发展阶段,一片测试条使用的材料和设备加工成本大约0.014美元)。

参考文献:

- [1] 王品鑫. 微系统设计与制造[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [2] Shoji S, Esashi M. Microflow devices and systems[J]. J. Micromech. Microeng, 1994,4(4):157-171.
- [3] Gardeniers JGE, van den Berg A. Lab-on-a-chip systems for biomedical and environmental monitoring[J]. Anal. Bioanal. Chem, 2004,378(7):1700-1703.
- [4] Catherine R, Hyewon L, Alison H, et al. Microfluidics for medical diagnostics and biosensors[J]. Chem. Eng. Sci, 2011, 66(7):1490-1507.
- [5] Asensio RM, Hernández BJ, Rocco A, et al. Food analysis: a continuous challenge for miniaturized separation techniques[J]. J. Sep. Sci, 2009,32:3764-3800.
- [6] Atalay YT, Vermeir S, Witters D, et al. Microfluidic analytical systems for food analysis[J]. Trends Food Sci. Technol, 2011,22(7):386-404.
- [7] Yager P, Edwards T, Fu E, et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health[J]. Nature, 2006,442(7101):412-418.
- [8] Altinier S, Zaninotto M, Mion M, et al. Point-of-care testing of cardiac markers: results from an experience in an emergency department[J]. Clin. Chim. Acta, 2001,311(1):67-72.
- [9] Sia SK, Kricka LJ. Microfluidics and point-of-care testing[J]. Lab Chip, 2008,8(12):1982-1983.
- [10] Dungchai W, Chailapakul O, Henry CS. Electrochemical detection for Paper-Based Microfluidics[J]. Anal. Chem, 2009,81:5821-5826.
- [11] Martinez AW, Phillips ST, Butte MJ, et al. Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays[J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2007,46(8):1318-1320.
- [12] Martinez AW, Phillips ST, Wiley BJ, et al. FLASH: a rapid method for prototyping paper-based microfluidic devices[J]. Lab Chip, 2008,8:2146-2150.
- [13] O'Halloran MP, Pravda M, Guilbault GG. Prussian blue bulk modified screen-printed electrodes for H₂O₂ detection and for biosensors[J]. Talanta, 2001,55(3):605-611.
- [14] Nie Z, Nijhuis CA, Gong J, et al. Electrochemical sensing in paper-based microfluidic devices[J]. Lab Chip, 2010,10(4):477-483.
- [15] Martinez AW, Phillips ST, Carrilho E, et al. Simple telemedicine for developing regions: camera phones and paper-based microfluidic devices for real-time, off-site diagnosis[J]. Anal. Chem, 2008,80(10):3699-3707.
- [16] Hones J, Muller P, Surridge N. The technology behind glucose meters: test strips[J]. Diabetes Technol. Ther, 2008,10:S10-S26.
- [17] Tan SN, Ge L, Wang W. Paper disk on screen printed electrode for one-step sensing with an internal standard[J]. Anal. Chem, 2010,82(21):8844-8847.
- [18] Fang HL, Zheng HX, Ou MY, et al. One-step sensing lead in surface waters with screen printed electrode[J]. Sens. Actuators B, 2011,153(2):369-372.
- [19] Carvalhal RF, Kfoury MS, Piazzetta MHO, et al. Electrochemical detection in a paper-based separation device[J]. Anal. Chem, 2010,82(3):1162-1165.
- [20] Richter MM. Electrochemiluminescence (ECL)[J]. Chem. Rev, 2004,104(6):3003-3036.
- [21] Forster RJ, Bertoncello P, Keyes TE. Electrogenated chemiluminescence[J]. Annu. Rev. Anal. Chem, 2009,2:359-385.
- [22] Barbante GJ, Hogan CF, Mechler A, et al. Electrochemiluminescence of surface bound microparticles of ruthenium complexes[J]. J. Mater. Chem, 2010,20(5):891-899.
- [23] Dennany L, Hogan CF, Keyes TE, et al. Effect of surface immobilization on the electrochemiluminescence of ruthenium-containing metallopolymers[J]. Anal. Chem, 2006,78,1412-1417.
- [24] Miao WJ. Electrogenated chemiluminescence and its biorelated applications[J]. Chem. Rev, 2008,108(7):2506-2553.

- [25] Delaney JL, Hogan CF, Tian JF, et al. Electrogenated chemiluminescence detection in paper – based microfluidic sensors[J]. Anal. Chem, 2011,83:1 300 – 1 306.
- [26] Martinez AW, Phillips ST, Carrilho E, et al. Simple telemedicine for developing regions: camera phones and paper – based microfluidic devices for real – time, off – site diagnosis[J]. Anal. Chem, 2008,80:3 699 – 3 707.
- [27] Dungchai W, Chailapakul O, Henry CS. Electrochemical detection for Paper – Based Microfluidics[J]. Anal. Chem, 2009,81:5 821 – 5 826.
- [28] Carvalho RF, Kfour MS, Piazzetta MHD, et al. Electrochemical detection in a paper – based separation device[J]. Anal. Chem, 2010,82(3):1 162 – 1 165.
- [29] Apilux A, Dungchai W, Siangproh W, et al. Lab – on – paper with dual electrochemical/colorimetric detection for simultaneous determination of gold and iron[J]. Anal. Chem, 2010,82(5):1 727 – 1 732.
- [30] Heller A, Feldman B. Electrochemical glucose sensors and their applications in diabetes management[J]. Chem. Rev, 2008,108(7):2 482 – 2 505.
- [31] Nie ZH, Deiss F, Liu X, et al. Integration of paper – based microfluidic devices with commercial electrochemical readers [J]. Lab Chip, 2010,10:3 163 – 3 169.

Integration of Paper – based Microfluidic Devices with Electrochemical Detection

TANG Fang^{1,2}, XING Hong-long¹, BI Lian-hua², ZHENG Hu-xiang², WANG Wei²

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, China;
2. School of Chemical and biological Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: Paper – based microfluidic devices are found that they are disposable, easy – to – fabricate, and lower – cost compared to traditional microfluidic devices. This paper presented an overview on the present state of microfluidic devices and the related characteristics of filter paper and electrochemical detection. Filter paper applied in microfluidic devices coupled with electrochemical detection is mainly introduced. Meanwhile, the integration of commercial detector will establish a firm foundation for the commercialization of microfluidic devices in the future.

Keywords: disposable microfluidic devices; filter paper; electrochemical detection; real – time and on – site analysis; review

(责任编辑:沈建新)