

文章编号 1004-924X(2011)05-1068-07

毛细管电泳非接触电导检测电极结构的设计

张海峰^{1*}, 邵宪辉¹, 刘晓为^{1,2}, 王蔚¹

- (1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对毛细管电泳非接触电导检测电极间的寄生电容对检测信号的影响,研究了非接触电导检测器检测电极的结构。采用边界元素法研究了毛细管电泳非接触检测电极间的寄生电容,通过静电场软件仿真了两电极之间的电场分布,优化了非接触电导检测的电极结构。根据仿真结果提出了一种三明治式电极结构,其有效电极长度为 200 μm ,解决了传统电极结构寄生电容较大的问题,也克服了传统三电极结构检测电极易于折断的缺点。实验和仿真结果表明,相对于传统的电极结构,三明治式电极结构检测器的寄生电容为 10^{-15} F,减小了一个数量级。另外,该检测器在 220 V/cm 的分离场强下两种无机离子可在 40 s 内实现完全的分离检测。得到的结果显示三明治式电极结构适合于毛细管电泳非接触电导检测,可以提高非接触电导检测法的灵敏度。

关键词:毛细管电泳;非接触电导检测;边界元素法;电极结构;仿真

中图分类号:O657.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.1068

Design of detection electrode on contactless conductivity detector for capillary electrophoresis

ZHANG Hai-feng^{1*}, SHAO Xian-hui¹, LIU Xiao-wei^{1,2}, WANG Wei¹

- (1. MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
 2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structure Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)
- * Corresponding author, E-mail: moonzhf@163.com

Abstract: The structure of detecting electrodes in a conductivity detector was studied to decrease the effect of the stray capacitance between the two electrodes on the detecting signal in capillary electrophoresis. The boundary element method was used to study the stray capacitance of two electrodes in contactless conductivity detection. Then, an electric field software was taken to simulate the electric field distribution of electrodes and to optimize the electrode structure with contactless conductivity. On the basis of simulated results, a novel sandwich electrode structure was proposed to decrease the direct capacitive coupling between the two electrodes. The effective length of the electrode is 200 μm , which decreases the stray capacitance between the two electrodes and overcomes its defect to be easy to breakdown. The experimental and simulation results indicate that the stray capacitance of proposed electrode structure is about 10^{-5} F, which has been decreased about one order of magnitude as compared

收稿日期:2010-03-26;修订日期:2010-09-10.

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(No. E200917)

with those of conventional electrode structures. Moreover, two inorganic cations can be separated in 40 s at 220 V/cm separation voltage. In conclusion, the sandwich electrode structure is suitable for the contactless conductivity detection and improves detection sensitivity.

Key words: capillary electrophoresis; contactless conductivity detection; boundary element; electrode structure; simulation

1 引言

毛细管电泳芯片非接触电导检测(Contactless Conductivity Detection, CCD)由于电极与溶液不接触,有效地克服了检测过程中电极污染和高压干扰的难题,在生化分析领域中具有广泛的应用前景^[1-5]。非接触电导检测是通过测量检测电极间溶液的阻抗来实现对物质分离检测的,增大检测电容有利于提高系统的检测灵敏度,但是增大检测电容的同时,两电极间的寄生电容相应也会增大,检测电极间的寄生电容严重影响系统的检测灵敏度^[6]。

近年来,国内外很多的学者报道了一些减小电极间寄生电容的方法。Fracassi 在两检测电极之间引入接地的屏蔽法拉第电极来减小寄生电容^[7];Hauser 将检测电极进行反平行排列,通过减小两个电极之间的正对面积来减小寄生电容^[8]。但是,这些方法不能够有效地减小检测电极的长度,因此,并不能够从本质上消除两电极之间的寄生电容。针对目前对非接触电导检测电极结构的理论研究尚不完善,本文采用边界元素法详细地研究了非接触电导检测器电极间的寄生电容,优化了检测电极结构,设计了一种三明治式的电极结构,实现了两种无机离子的分离检测。

2 理论方法

为了便于理解非接触电导检测的基本原理,国内外很多的学者提出了非接触电导检测池的简化等效电路模型,其中最常使用的检测器结构为两电极和三电极的检测器结构,Lichtenberg 提出的检测池的等效电路如图 1 所示^[9]。

根据图 1 的等效电路图,检测池的总阻抗为:

$$Z_{total} = \frac{Z_L \left(\frac{R_s Z_s}{R_s + Z_s} + 2Z(b) \right)}{\frac{R_s Z_s}{R_s + Z_s} + Z_L + 2Z(b)}, \quad (1)$$

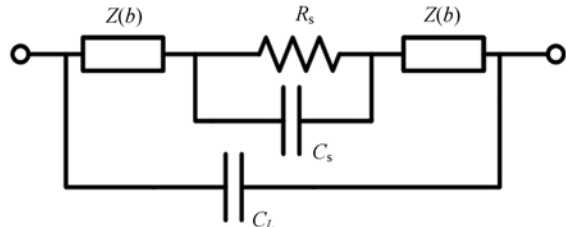


图 1 毛细管电泳非接触电导检测简化的等效电路模型
Fig. 1 Simplified equivalent circuit model of CCD

式中 Z_L 为两检测电极之间寄生电容的阻抗, $Z(b)$ 为电极正对面积下的溶液阻抗,由于 CCD 芯片采用的是矩形铝箔电极,寄生电容可以看作平行板电容器,则其阻抗 Z_L 为:

$$Z_L = \frac{1}{j\omega C_L} = -\frac{j l}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_l l_1 d_2}, \quad (2)$$

其中, l_1 为两电极正对的长度, ϵ_l 为空气的介电常数, d_2 为电极板的厚度, l 为两电极之间的距离, Z_s 为两电极之间的溶液电容,其值为:

$$Z_s = \frac{1}{j\omega C_s} = \frac{1}{j\omega \frac{\epsilon_s \epsilon_0 a a_1}{l}} = \frac{l}{j\omega \epsilon_s \epsilon_0 a a_1}. \quad (3)$$

由公式(1)可知,非接触电导检测池的总阻抗同检测池的几何参数(电极长度、电极间距、电极尺寸、分离沟道的尺寸)缓冲溶液及其交流电压的频率有关。其中,两电极之间的寄生电容 Z_L 对检测池总阻抗具有重要的影响,因此,减小两电极之间的寄生电容,可以减小检测池的总阻抗,有助于改善非接触电导检测法的灵敏度。

边界元素法(Boundary Element Method, BEM)是从 70 年代逐步发展起来的求解偏微分方程的数值方法。它是经典的边界积分方程为基础,吸取了有限元方法的离散化技术而产生的,其突出特点是将所处理问题的空间维数降低一维。当前,边界元素法已被用于电磁场,弹性力学、流体力学及等离子体等许多研究领域的数值计算中。近年来,边界元素法在 3-D 寄生电容的计算中得到广泛的应用。与有限差分法及有限元

素法相比,它具有精度高、变量数目少以及处理复杂边界能力强等优点^[10-11]。静电场中多个导体之间的耦合关系可用电容矩阵来描述。对 N 个导体问题,第 i 个导体上的电荷可表示为:

$$Q_i = (C_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{ij}) \Phi_i - \sum_{j=1}^N C_{ij} \Phi_j, \quad (4)$$

式中 Q_i 为线 i 个导体上的电荷, Φ_j 为线 j 的电势。当 $i=j$ 时, C_{ij} 表示线 i 对地电容; $i \neq j$ 时, C_{ij} 表示两线间耦合电容,将其表示成矩阵形式为:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{\Phi}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N]$, $\mathbf{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N]$, \mathbf{C} 则为系统的电容矩阵。由电学知识可知,电容计算的基本公式为:

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (6)$$

其中, U 是电容器两极间的电压, Q 是电容器电极上的电荷量。对于复杂多导体结构,计算任意两电极 i 和 j 之间的电容 C_{ij} ,可以在这两个电极之间置偏压 $U_{ji} = 1 \text{ V}$, 求出电极 i 表面上感应出来的电荷量 Q_i ,那么

$$C_{ij} = -\frac{Q_i}{U_{ji}} = -Q_i, \quad (7)$$

$$Q_i = \int_{\Gamma_i} \epsilon \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma, \quad (8)$$

式中 ϵ 是介质的介电系数。由式(6)~(8)可知,只要在电容器的某两极间加上 1 V 的偏压,求出低电位一极表面上法向电场强度 $q = \partial u / \partial n$,即可求出相应的电容值;而利用边界元素法求解带混合边界条件的拉普拉斯(Laplace)方程即可求得法向电场强度。

混合边界条件的拉普拉斯(Laplace)方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_i \nabla^2 u = \epsilon_i \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{q} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} = q_0 = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

$In \Omega_i (i=1, \dots, M)$
 $On \Gamma_n$
 $On \Gamma_q$

其中, Ω_i 表示第 i 个介质占据的空间区域。 Γ_n 是强加边界(导体表面),其上电势已知,由偏置电压确定。 Γ_q 是自然边界(模拟区域边界,即介质边界),其上法向电场 $\mathbf{q} = \partial u / \partial \mathbf{n}$ 为零, \mathbf{n} 是边界单位外法向量, M 是区域 Ω 中所含介质数。此外,在

相邻两介质区域 a, b 的交界面上满足如下的连续性方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_a \cdot \partial \mathbf{u}_a / \partial \mathbf{u}_a = -\epsilon_b \cdot \partial \mathbf{u}_b / \partial \mathbf{u}_b \\ \mathbf{u}_a = \mathbf{u}_b \end{array} \right. \quad (10)$$

求解上述混合拉普拉斯方程可以采用边界元素法。由拉普拉斯方程的解得到电极表面的法向电场强度,对法向电场强度进行积分得到电极表面的电荷量,由公式(6)就能够得到两电极之间的寄生电容的大小。

3 检测电极结构仿真

为了直观比较电极结构和寄生电容的关系,优化检测电极结构,本文采用电磁场软件仿真了电极周围的电势分布。

3.1 两电极结构

非接触电导检测芯片最初采用两电极结构,其中一个电极作为激励电极,另外一个电极作为检测电极。两电极结构的电泳芯片的寄生电容与电极的几何尺寸有关。实验中选取电极宽度为 1 mm ,厚度为 $30 \mu\text{m}$,电极之间的间距为 1 mm ,采用电磁场仿真软件对两电极之间的寄生电容进行了仿真,在其中一个电极上加载 10 V 的电压,另外一个电极上加 0 V 的电压,采用静电场仿真软件对电极周围的电场进行仿真,两电极周围的电场分布如图 1 所示。

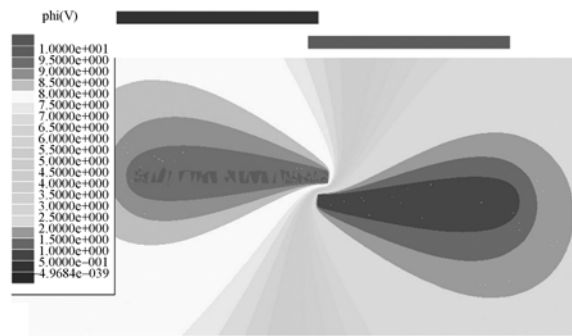


图 2 两电极结构及其电极周围的电场分布图

Fig. 2 Scheme of two electrode structures and electric field distribution

由图 2 可知,两个检测电极在静电场的作用下,通过空气和有机玻璃耦合形成了寄生电容。寄生电容主要由两电极之间的电势差形成,两电极之间正对部分的电场分布越不对称,正对面积越大,寄生电容也就越大。图 3 是采用边界元素

法和实验测试所得的相同电极长度、厚度和宽度下,不同正对长度下的两电极间寄生电容,由图可知,寄生电容的大小与正对电极的长度成线性关系。减小两电极之间的正对面积,能够有效地减小两电极之间的寄生电容,该结论与很多文献报道相一致。实验测试寄生电容比理论计算值大一些,分析原因认为是两个检测电极直接粘接在有机玻璃上,有机玻璃的相对介电常数比空气中的大,因此测试值比理论计算值大。由图 2 可知,由于空气和有机玻璃耦合,两电极之间的寄生电容相对较大,在垂直于每个电极方向,电场强度沿着法线方向并不对称,因此,随着两电极之间正对面积的增加,造成理论计算的寄生电容的斜率和实际测试值的斜率不一致,但寄生电容的测试曲线和理论曲线趋势相同,寄生电容大小与两电极之间的正对长度满足很好的线性关系。

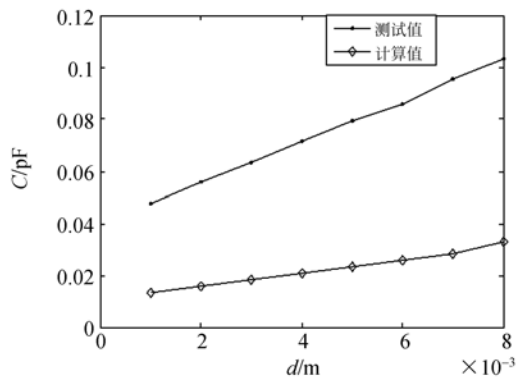


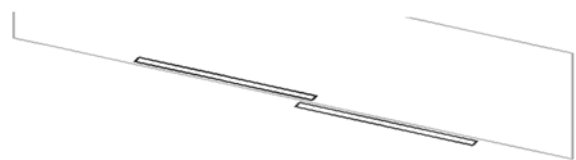
图 3 电极正对面积对寄生电容的影响

Fig. 3 Effect of overlap lengths of electrodes on stray capacitance

3.2 三电极结构

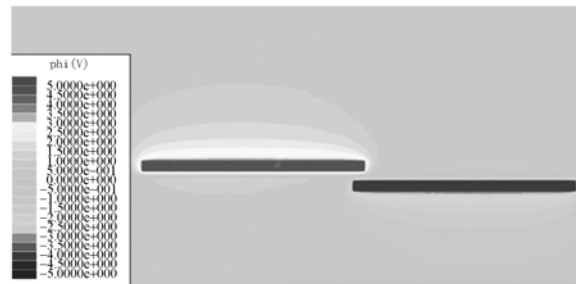
为了减小两电极之间的寄生耦合电容,很多文献采用三电极结构来消除两电极之间的寄生耦合电容。为了比较三电极结构的两检测电极之间的寄生电容,采用静电场仿真软件仿真了三电极结构周围的电场分布图,图 4(a)为三电极的电极结构图,(b)为三电极及其周围的电场分布仿真图。

由图 4 可知,由于法拉第屏蔽电极的引入,激励电极与法拉第屏蔽电极之间形成了一个对地相对较大的寄生电容,接收电极与法拉第屏蔽电极之间也形成了接地的寄生电容,这两个寄生电容对检测性能并没有太大的影响。三电极结构相对于两电极结构,电极周围的空间电场相对减弱,特



(a)三电极结构

(a) Three electrode structure



(b)电场分布

(b) Electric field distribution

图 4 三电极结构及其电极周围的电场分布仿真图

Fig. 4 Scheme of three electrode structure and electric field distribution

别是两电极之间的电场变弱,屏蔽电极很好地屏蔽掉了两电极之间的电场,两电极之间直接的寄生耦合电容减小。

3.3 三明治式电极结构

上述的电极结构虽然能够有效地减小两电极之间的寄生耦合电容,但电极是直接粘接在非接触电导检测的盖片上,电极与激励源和检测电路相连,有效长度并不能够减小,在使用的过程中,电极很容易折断,给实验带来很多不便。为了进一步减小电极间的寄生电容,本文提出了一种新颖的三明治电极结构,检测电极结构如图 5 所示^[12]。检测电极制作在电极 PMMA 底座上,两片 $2\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 0.02\text{ mm}$ 的铝箔分别构成电泳芯片的检测电极和激励电极,检测电极的末端被加宽到 5 mm ,目的是便于与接线柱进行连接。铝箔电极被 2 个 $30\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 的铜板进行隔离,在铜板的中间 10 mm 的部分采用绝缘胶带进行处理,防止铝箔电极和铜箔接地电极短路。 $30\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的法拉第电极将两个三明治电极结构分开,法拉第屏蔽电极与接地铜箔电极相连,屏蔽电极比铜箔电极稍长。两个接线柱贯穿 PMMA 基座与铝箔电极进行相连,分别于交流信号源和检测电路相连。电极底

座通过 4 个螺栓进行固定形成一个整体。由于该检测电极结构与非接触电泳芯片的结构进行分离,所以电极底座能够沿着分离沟道移动,便于对不同分离位置处的电泳分离图谱进行监测。

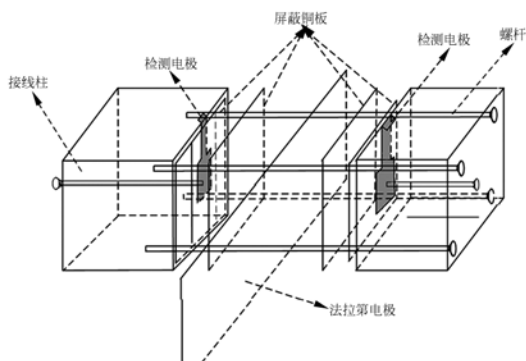


图 5 三明治式电极结构示意图

Fig. 5 Electrode structure based on sandwich

由于裸露在空气中的电极的有效长度可以非常短,在电极表面的电荷积累相对较小,因此,暴露在空气中的电极耦合电场非常微弱,图 6 分别是 xy 平面内的两电极周围的电势分布,由图可知,由于检测电极被接地法拉第电极完全屏蔽,在水平面内电极周围的电场迅速降为 0。新的屏蔽结构能够有效地减小寄生电容。当检测电极的宽度为 2 mm 时,通过理论仿真计算,两电极之间的寄生电容为 1.26×10^{-15} F,改进后电极结构与两电极结构相比,寄生电容下降了一个数量级,寄生电容与检测电容相比,可以忽略不计,因此,新的结构能够有效地减小寄生电容对检测性能的影响,可以提高系统的检测灵敏度。

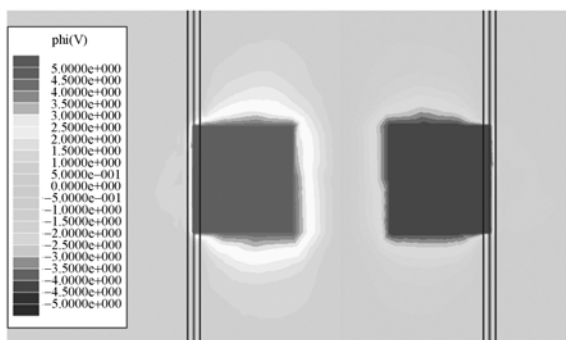


图 6 三明治电极结构电泳芯片电极周围的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of electrodes based on sandwich structure

4 实验测试

实验中采用自制的十字交叉 PMMA 电泳芯片,检测平台的主要装置包括:12 V 直流稳压电源,4 路高压直流电源、信号产生电路、检测电路、高压控制电路和计算机^[13]。由上位机软件自动控制样本溶液的进样和分离时间,分析物经过高压进样后,在高压电场的作用下流经检测池,由检测电路监测检测池溶液阻抗的变化,检测的电泳信号经过串口将数据实时地传送给计算机,计算机记录分析物的图谱,非接触电导检测的实验系统结构如图 7 所示。

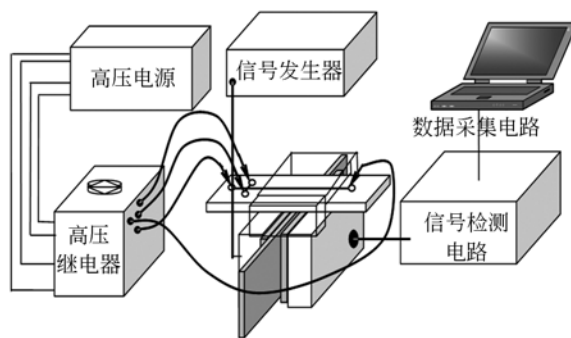


图 7 非接触电导检测系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of contactless conductivity detection

分离前将配置的标准缓冲溶液(200 mmol/L 的 MES/His)用水稀释 10 倍,配置成 20 mmol/L 的缓冲溶液。将 20 mmol/L 的 KCl 和 $MgCl_2$ 的混合溶液用缓冲溶液稀释 20 倍。所有的溶液在使用前采用 $0.45 \mu m$ 滤纸过滤。超声 5 min 除气,使溶液混合均匀。激励电压幅值为 20 V,频率为 120 kHz;通过对检测池的结构参数优化,选择分离沟道的宽度为 $120 \mu m$,电极宽度为 1.0 mm,电极绝缘层厚度为 $30 \mu m$,电极间距为 1.0 mm,分离沟道的深度为 $100 \mu m$ 的条件下对混合溶液进行分离检测^[14]。两种离子的电泳分离图谱如图 8 所示, K^+ 和 Mg^{2+} 的出峰时间分别为 20 s 和 35 s,两种离子能够在 40 s 的时间内进行有效的分离。

检测系统在没有采用屏蔽的条件下,通过实验检测得到 K^+ 和 Mg^{2+} 的检测灵敏度分别为

10^{-7} mol/L 和 10^{-6} mol/L, 该检测电极结构具有较高的检测灵敏度。

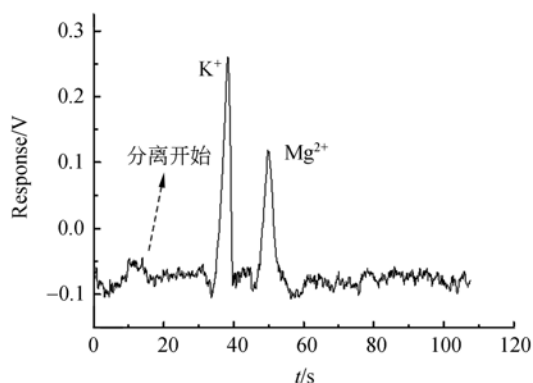


图8 无机离子的分离电泳图谱

Fig. 8 Electropherogram of inorganic cation

参考文献:

- [1] MAYRHOFER K, ZEMANN A J, SCHNELL E. Capillary electrophoresis and contactless conductivity detection of Ions in narrow inner diameter capillaries[J]. *Anal. Chem.* 1999, 71:3828-3833.
- [2] MIKA J, OPEKAR F, COUFAL P, et al.. A thin-layer contactless conductivity cell for detection in flowing liquids[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 650:189-194.
- [3] PORMSILA W, STEPHAN KRAHENBUHLER, PETER C. Hauser. Capillary electrophoresis with contactless conductivity detection for uric acid determination in biological fluids[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 636:224-228.
- [4] HUANG Z Y, JIANG W W, ZHOU X M, et al.. A new method of capacitively coupled contactless conductivity detection based on series resonance[J]. *Sensors and Actuators B*, 2009, 143:224-228.
- [5] MARKE TA RYVOLOVA, PREISLER J, FRANTISEK FORET, et al.. Combined Contactless Conductometric, Photometric, and Fluorimetric Single Point Detector for Capillary Separation Methods[J]. *Anal. Chem.*, 2010, 82:129-135.
- [6] ALVES J G, FRACASSI J A, BLANESA L, et al.. Understanding Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection in Capillary and Microchip Electrophoresis. Part 2. Peak Shape, Stray Capacitance, Noise, and Actual Electronics [J]. *Electroanalysis*, 2005, 17(13):1207-1214.
- [7] FRACASSI J A, SILVA D, LAGO D. An oscillographic detector for capillary electrophoresis[J]. *Anal. Chem.* 1998, 70:4339-4343.
- [8] KUBAN P, HAUSER P C. Effects of the cell geometry and operating parameters on the performance of an external contactless conductivity detector for microchip electrophoresis[J]. *Lab Chip*. 2005, 5:407-415.
- [9] LICHTENBERG J, ROOIJ N F. E verpoorte. A microchip electrophoresis system with integrated in-plane electrodes for contactless conductivity detection[J]. *Electrophoresis*, 2002, 23:3769-3780.
- [10] 古江春, 王泽毅, 洪先龙. 三维寄生电容边界元计算的半解析积分方法[J]. *电子学报*. 2000, 28(5): 820-821.
GU J C, WANG Z Y, HONG X L. Semi-analytical Integration Approach in 3-D Parasitic Capacitance Computation with BEM[J]. *Acta electronica sinica*, 2000, 28(5):820-821. (in chinese)
- [11] 侯劲松, 王泽毅, 周春玲. 二维任意形状寄生电阻电容的边界元计算[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*. 1996, 8(3):215-221.
HOU J S, WANG Z Y, ZHOU C L. The calculation of two-dimensional parasitic resistance and capacitance with realistic shapes by using the boundary element method[J]. *Chin. j. CAD & CG*.

5 结 论

本文根据非接触电导检测器现有的检测电极结构存在的问题, 采用边界元方法设计了一种新颖的三明治式非接触电导检测电极, 有效地减小了检测电极的长度。新结构的检测电极寄生电容仅为 10^{-15} F, 相对于传统的两电极和三电极结构寄生电容减小了一个数量级。在 220 V/cm 的分离场强下完成了两种混合无机离子的分离检测, K^+ 和 Mg^{2+} 的检测灵敏度分别为 10^{-7} mol/L 和 10^{-6} mol/L。本文为非接触电导检测器电极结构设计提供了理论依据, 三明治式的电极结构能够有效地提高非接触电导检测的检测灵敏度。

1996, 8(3):215-221. (in chinese)

- [12] LIU X W, ZHANG H F, SHAO X H, *et al.*. Contactless conductivity detector for capillary electrophoresis chip[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2009,7(2):123-126.
- [13] LIU H T, WENG Z Y, XU Y, *et al.*. Design of

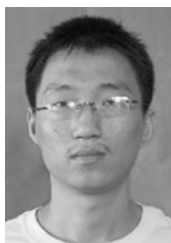
contactless conductivity detecting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1640-1645. (in Chinese)

- [14] ZHANG H F, LIU X W, LI H T, *et al.*. Effect of the detector parameters on the sensitivity of contactless conductivity detector for microchip electrophoresis[J]. *ICSC*. 2008,355-358.

作者简介:



张海峰(1978—),男,新疆沙湾人,博士,2005年于空军工程大学获得硕士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事生物芯片、无线传感器网络方面的研究。E-mail: moonzhf@163.com



邵宪辉(1986—),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要从事生物芯片和无线传感器网络方面的研究。E-mail: huihui6007@163.com



刘晓为(1955—)男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982年、1988年、2003年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学微电子科学与技术系主任,MEMS中心主任,主要从事ASIC接口电路、MEMS传感器、微能源、生物芯片和无线传感器网络技术的研究。E-mail: lxw@hit.edu.cn



王蔚(1960—)女,上海人,女,博士,副教授,1983年于华东工程学院获学士学位,1993年于华东工学院获硕士学位,2007年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微电子技术与MEMS器件的教学与科研工作。E-mail: wangweihit@hit.edu.cn

●下期预告

新型浊度探测器设计、制备及表征

祁志美,刘 桥,刘瑞鹏

(中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室,北京 100190)

在浊度测量特别是水下长期在线浊度探测领域,有效数据的获得需要克服因器件不稳定以及出光窗口污染造成的干扰。本文针对太湖水环境监测无线传感网中包含的在线浊度探测要求,提出了一种使用双散射光功率比值表征浊度的探测方法。该方法使用一束平行光照射待测环境,并沿光路探测两点的 90° 散射光功率,然后对获得的两个散射光功率值进行比值处理,以此得到待测环境的浊度。使用该方法设计了一种新的浊度探测结构。该结构满足严格的 90° 散射探测,且入射光与试样表面的夹角也为 90° 。理论推导和结构分析表明,该浊度探测器能有效降低光源漂移和窗口污染造成的扰动。实验结果显示,该方法表征的浊度系数与光衰减度线性良好,数据与理论计算相符,且有效降低了光源不稳定带来的影响,适宜于水下在线探测浊度。