材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022080101

导电岛微电极系统中纳米线介电组装行为研究

丁海涛*，司糈昊，张景然，刘潇锋，杨　强

（长春理工大学 机电工程学院，长春 130000）

摘　要： 为了获得导电岛微电极系统中纳米线的介电组装特性，基于平面微电极对和导电岛微电极系统，进行了两种系统中纳米线操控的对比实验。分别建立了平面微电极对和导电岛微电极系统的纳米线介电组装模型，探究了两种模型下的纳米线从初始位置到最终桥接上微间隙过程中的运动轨迹；分析了导电岛微电极系统中纳米线所受的介电泳力、交流电热流以及两者合作用的电动力学行为。导电岛微电极系统对纳米线有着较强的介电俘获作用，导电岛的加入能够让纳米线更好地俘获到微间隙；同时纳米线的介电组装会受到频率的影响，当频率达到翻转频率，在微间隙上方产生的微流体漩涡能够把远场区域纳米线输送到组装区，使得纳米线受到正介电泳力的作用而被组装至微间隙。

关键词： 平面微电极对；导电岛微电极系统；介电泳；交流电热流；纳米线

中图分类号： TN305　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1148－07

Study on the Dielectric Assembly Behaviors of Nanowires in the Conductive Island Microelectrode System

DING Haitao, SI Xuhao, ZHANG Jingran, LIU Xiaofeng, YANG Qiang

(School of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, CHN)

Abstract: In order to obtain the dielectric assembly characteristics of nanowires in the conductive island microelectrode system, a comparative experiments of nanowire manipulation in both systems were conducted based on the planar microelectrode pairs and the conductive island microelectrode systems. The nanowire dielectric assembly models of the planar microelectrode pairs and the conductive island microelectrode systems were established respectively: The motion trajectory of the nanowires from the initial position to the final bridging onto the microgap under the two models was explored. And the nanowires subjected to dielectrophoretic forces, alternating current heat flow, and the electrokinetic behavior of cooperation between the two in a conductive island microelectrode system were analyzed. The conductive island microelectrode system has a strong dielectric capture effect on nanowires, and the addition of conductive islands can make better capture of nanowires to the microgap. Meanwhile, the dielectric assembly of nanowires is affected by frequency. When the frequency reaches the flip frequency, the microfluidic vortex generated above the microgap can transport nanowires in the far-field region to the assembly area, which makes the nanowires to be assembled to the microgap by the positive dielectrophoretic force.

Key words: planar microelectrode pairs; conductive island microelectrode system; dielectrophoresis; alternating current electrothermal flow; nanowires

收稿日期：2022－08－01.

基金项目：国家自然科学基金项目(51905047)；吉林省教育厅项目(JJKH20200748KJ).

* **通信作者：**丁海涛　**E-mail:** dhtding@163.com

0　引言

精确操控和组装纳米线到特定区域是纳米电子器件制备过程中的重要问题之一，这是由于纳米线的目标位置直接决定了该类器件的整体性能。介电泳技术是一种利用非均匀电场诱导纳米对象极化产生介电泳力而定向移动的操控方法[1-2]。由于其能够有效调整操控纳米对象的方向和位置且具有较高的灵敏度、灵活的操控性和可实现微型化等特点而受到了广泛的关注。这种技术可以实现操控纳米粒子[3-4]、纳米线[5-6]、纳米管[7]等纳米材料定向移动到特定位置进行组装，对光学器件[8]、传感器[9]、生物芯片[10]等纳米电子器件的制造具有深远意义。介电泳技术可以应用在微电极系统中实现纳米电子器件的性能提升，并且微电极系统的结构能够对介电组装结果产生影响，因此可以通过改变微电极系统的结构实现介电泳技术对性能的提升。

导电岛微电极系统是一种依托于微电子电路基础上建立的模型，是指在平面微电极对间隙内增加单个或多个孤立的导电结构与电极对组合而成的电极系统[11]。不同于传统微电极系统，导电岛微电极系统由于在电极间引入导电结构，其电场分布发生改变，能够有效提升介电泳力操控纳米材料定域组装的性能，该系统展现出独特的组装性能，利用导电岛电极系统制造的传感器的性能得到了进一步提高[12]。Ding 等研究了导电岛微电极系统的纳米粒子介电组装模型，发现不同特征角度的导电岛不仅会影响介电泳力的分布而且会影响粒子线的形貌特征[13]。崔祥干等设计了纳米微粒在纳米电极系统中的组装实验，发现纳米颗粒在该系统中显示出两种组装模式而且可以通过调控频率来改变组装强度[14]。

利用纳米线进行介电组装的微电极系统多被应用于气体传感器[15]、光电探测[16]及光催化[17]等方面，旨在改善传感器响应速度、探测效率及光催化灵敏度。Suehiro 等[18]提出利用介电泳力把合成的 ZnO 纳米线俘获在微电极间隙中电场强度较高的位置，俘获的纳米线沿着电场线分布，并且连接了两个电极。Shaalan 等[19]利用介电泳将 SnO_2 纳米线组装至平面微电极对间隙处，制成气敏传感器并对传感能力进行测试；Peng 等[20]通过介电泳技术，在间隙处滴有石墨烯氧化片悬浮液的平面微电极对上制备了基于石墨烯氧化片的电路。本文基于电子束 Lift-off 方法制备了平面微电极对和导电岛微电极系统，通过实验和仿真相结合的方法分析了纳米线在微间隙的介电组装实验过程并获得了纳米线的介电组装特性，基于导电岛微电极系统纳米线介电组装研究为纳米电子器件奠定了制备基础。

1　介电组装实验工艺与过程

传统制备电极系统的方法主要有光学曝光工艺[21]和电子束曝光技术[22]。在本文平面微电极对和导电岛微电极系统的制备过程中，传统光学曝光在样件制备的清晰程度等方面无法达到要求，而电子束曝光工艺没办法实现图形转移，所以本文采用电子束 Lift-off 方法制备平面微电极对和导电岛微电极系统。

首先，在具有二氧化硅的硅片上旋涂 EPG533 光刻胶，接着利用 explorer14 溅射系统溅射 10 nm 的铝层作为导电层，利用光刻技术在已涂覆光刻胶的硅片上光刻出相应的图案。光刻后，为了溅射出性能良好的黏附层与导电层，通过溅射系统用金属铬溅射出一层粘附层，并且在粘附层的基础上用金溅射出一层导电层。溅射完成后在丙酮溶液里对样件进行剥离，之后分别使用酒精和去离子水对样件进行清洗，并将其放置于 180 ℃ 的热板上加热 30 min，工艺流程如图 1 所示。在本实验中，平面微电极对和导电岛微电极系统的微间隙宽度约为 4 μm。

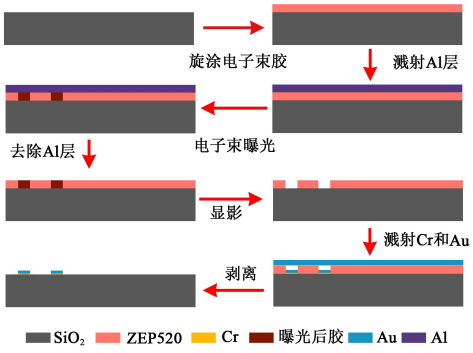


图 1　微米间隙电极系统制备流程图

本文使用 ZnO 纳米线进行微间隙介电组装实验，实验包括两种电极系统。图 2 是在导电岛微电极系统中建立的实验装置示意图。纳米线长度约为 4～5 μm，直径为 300 nm，所配置的分散液浓度为 10 μg/mL，在去离子水中加入 ZnO 纳米线粉末，超声处理 30 min。用微量进给器吸取纳米线溶液

(<3 μL)置于所选间隙上,使用探针(Wentworth Laboratories,MP1008)通过函数发生器(Agilent 33220A)向微电极对施加峰峰值为 10 V 的电压,驱动频率为 150 kHz。选择 Tektronix TDS 220 示波器接入电极两端对电压进行监测。当示波器显示电压突降,关闭函数发生器,并将样片放置于去离子水中,一段时间后利用氮气进行干燥处理。在悬浮液完全干燥后,通过 SEM 观察样品中电极对与导电岛微间隙之间纳米线桥接情况。

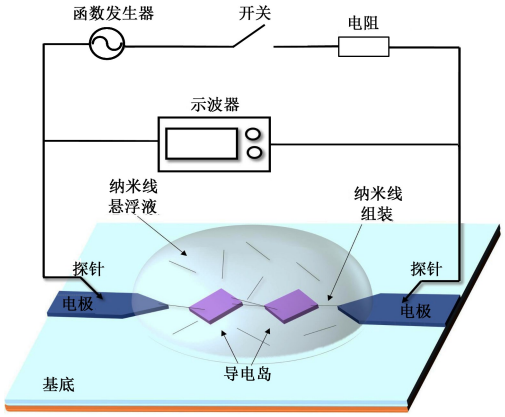


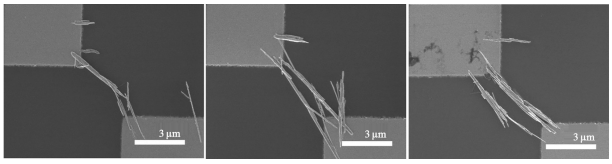
图 2 实验装置示意图

2 实验结果与仿真分析

2.1 实验结果

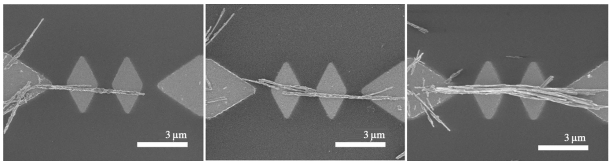
图 3 是施加不同频率时纳米线在平面电极对中介电组装的实验结果。当施加的频率为 150 kHz 时,从图(a)可以看出,有少数纳米线将电极对搭接起来,但并没有完整的单根纳米线搭接在电极对上,与此同时,在电极对之间的其他部分也沉积了少量纳米线;当施加的频率为 500 kHz 时,电极对之间仍然沉积有多根纳米线将其连接,但与 150 kHz 时相比,电极对之间的这种连接情况有了极大的改善,并且在电极对之间出现了平行于局部电场线的纳米线,如图(b)所示;图(c)是施加频率 1 MHz 时的实验现象,电极对之间已经有多根完整纳米线将其搭接,并且平行于局部电场线的纳米线也明显增多。

图 4 为施加不同频率时纳米线在导电岛微电极系统介电组装的实验结果,当施加的频率为 150 kHz 时,如图(a)所示,左侧的导电岛微间隙和两个导电岛之间的微间隙沉积有少量纳米线,但右侧导电岛微间隙并没有纳米线连接,且左侧电极上沉积少量纳米线;图(b)是施加的频率为 500 kHz 时的组装现象,整体组装的纳米线数量增加,右侧导电岛的微间隙搭接少量纳米线,其他微间隙之间仍然保持纳米线连接,并且在两侧电极上均出现了平行于局部电场线的纳米线;当施加的频率为 1 MHz 时,整个系统中纳米线组装量提升且微间隙均被多根纳米线搭接,并且平行于局部电场线的纳米线数量也明显增多,如图(c)所示。



(a) 150 kHz (b) 500 kHz (c) 1 MHz

图 3 平面微电极对中介电组装实验结果



(a) 150 kHz (b) 500 kHz (c) 1 MHz

图 4 导电岛微电极系统中介电组装实验结果

2.2 仿真分析

本文的仿真模拟采用 Comsol Multiphysics 分为两部分进行,首先模拟了平面微电极对和导电岛微电极系统中纳米线介电组装的过程,其次选择了介电组装效果更好的导电岛微电极系统从多物理场角度入手分析纳米线组装过程的电流、流体传热和层流。

2.2.1 纳米线介电组装模拟

图 5 是在施加的频率为 500 kHz 时,纳米线在上述的两种系统中运动过程的模拟图。在电场中,定义电极对电势一侧为 $V=1/2V_{pp}=5$ V,另一侧 $V=0$ V,定义 $V_{pp}=10$ V 代表实验过程中电压的峰值,电导率为 10^7 S/m。在定义流场的边界条件中,设定流体不可压缩流动。定义流体密度为 1 000 kg/m^3,动力学粘度为 0.001 Pa·s。在流体传热中,定义环境温度为 293.15 K 且流体的传热系数为 0.6 W/(m·K)。同时定义纳米线溶液为热绝缘。

由于电极对上施加了交流电压,纳米线被外加电场极化,产生的介电泳力可以驱动纳米线靠近或远离高场区域,这取决于纳米线及其周围介质的复介电常数;介电泳力的大小取决于电压、频率、材料属性和电极几何形状。纳米线的运动轨迹主要由 DEP 力决定,介电泳力产生的扭矩使纳米线沿着电场方向移动,避免剧烈运动,最终将纳米线吸附到电极附近。此外,范德华力和万有引力这二者也被认

为会影响纳米线的旋转。但这两种力的大小分别约为 10^{-12} 和 10^{-15} N，远小于 DEP 力（10^{-9} N）。因此，最终驱动纳米线运动的主要是 DEP 和 DEP 力产生的扭矩。

在两种纳米线介电组装模型中，都模拟了恰好可以落到微间隙上的纳米线的时间轨迹图。从图 5 中可以看出组装到微间隙上的纳米线都是由从远场区域输送过来进而被介电俘获组装的，但是导电岛微电极系统中组装到右侧微间隙的纳米线是由距离微间隙更远的地方输送过来组装的并且组装时间更短，定向组装效果更好。

其原因在于导电岛有利于改善系统中电场分布，使其定向移动的效果更好。为了更好地理解纳米线在微间隙电极系统中的组装效果，基于导电岛微电极系统，通过三维空间维度的多物理场分析了层流和流体传热，截取了计算域中穿过导电岛和电极中线的 xz 平面进行研究。

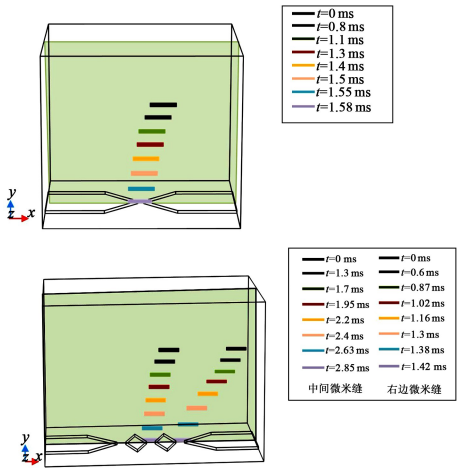


图 5　纳米线介电组装模型

2.2.2　纳米线介电泳力

在空间变化的外加电场 E 作用下，假设电场平方的梯度为常数的基础上，可以近似得到处于悬浮液中的纳米线上的时间平均介电泳力，如下式所示[23-25]：

$$\langle F_{\mathrm{DEP}}\rangle=\frac{1}{2}\pi R^2 L\varepsilon_{\mathrm{m}}\mathrm{Re}[\widetilde{K}_{\mathrm{a}}]\nabla E_{\mathrm{rms}}^2 \tag{1}$$

式中，R 是纳米线的半径，L 是纳米线的长度，ε_{m} 是周围液体的介电常数，E_{rms} 是电场的均方根值，$\widetilde{K}_{\mathrm{a}}$ 代表 CM(Clausius-Mossotti)因子，可以表示为

$$\widetilde{K}_{\mathrm{a}}=\frac{\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{p}}-\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{m}}}{3[\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{m}}+(\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{p}}-\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{m}})A]} \tag{2}$$

$$\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{p}}=\varepsilon_{\mathrm{p}}-\mathrm{i}\sigma_{\mathrm{p}}/\omega,\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{m}}=\varepsilon_{\mathrm{m}}-\mathrm{i}\sigma_{\mathrm{m}}/\omega \tag{3}$$

式中，$\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{p}}$ 和 $\tilde{\varepsilon}_{\mathrm{m}}$ 分别是纳米线和液体介质的复介电常数，而 $\varepsilon_{\mathrm{p}}=\varepsilon_0$，$\varepsilon_{\mathrm{m}}=80\varepsilon_0$ 代表粒子和液体介质的介电常数（$\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$ F/m 代表真空介电常数），$\sigma_{\mathrm{p}}=0.01$ S/m 和 $\sigma_{\mathrm{m}}=0.000\,4$ S/m 分别代表它们的电导率，A 是去极化因子，计算公式如下：

$$A=(4R^2)/L^2[\ln(L/R-1)] \tag{4}$$

本文中，半径为 150 nm 的纳米线的 CM 函数 $\widetilde{K}_{\mathrm{a}}$ 的频率依靠性如图 6 所示。

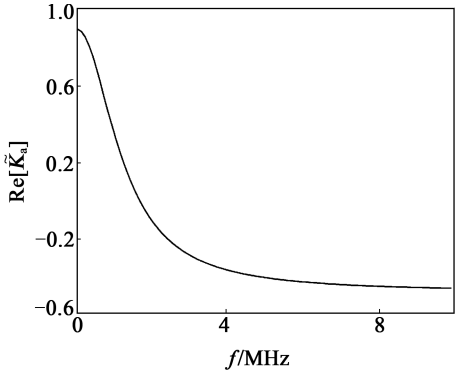


图 6　CM 因子的实部

如果 $\mathrm{Re}[\widetilde{K}_{\mathrm{a}}]>0$，纳米线极化率高于周围液体媒介时，纳米线将会在正介电泳力的作用下吸引到高电场强度的位置，这种现象称为正介电泳效应。相反地，纳米线极化率低于周围液体媒介时，纳米线将会在负介电泳力的作用下被输送到电场强度较低的区域，以将系统电能量最大化。如果 $\mathrm{Re}[\widetilde{K}_{\mathrm{a}}]=0$ 时，此时为介电泳交叉频率，本实验中，交叉频率约为 1.6 MHz。在频率小于 1.6 MHz 时，靠近微间隙附近区域的电场强度较大，此外纳米线将会在介电泳力的作用下被俘获到微间隙周围。图 7 显示了频率为 350 kHz 时介电泳力流速分布情况，纳米线运动的速度方向指向微间隙区域。

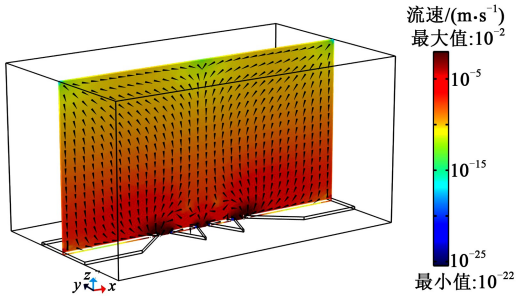


图 7　350 kHz 时截面一上介电泳力流速分布

2.2.3　交流电热流

交流热电流表明，在使用高频电场操纵纳米线的时候，流体的介电梯度会衍生出电热流。在上述

的高频电场环境下，如果同时满足高斯定理和电荷守恒方程[26]，则局部诱导自由电荷和极化电荷分布一定存在，最终导致液体中的纳米线在电场作用下发生输运现象。

利用外加非均匀电场操纵液体中的纳米线，流体的流速和方向会受到影响，其中频率作用至关重要。在频率大于 100 kHz 时，即高频电场作用在电极系统中，交流电热流的流速起主导作用。因此，分析交流电热流对纳米线运动的影响极其必要。液体中的流体单元受到的平均电热体积力密度为[27]

$$\langle f_{\mathrm{et}}\rangle=\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\frac{\sigma_{\mathrm{m}}\varepsilon_{\mathrm{m}}(\alpha-\beta)}{\sigma_{\mathrm{m}}+\mathrm{j}\omega\varepsilon_{\mathrm{m}}}(\nabla T\cdot\tilde{E})\tilde{E}^{*}-\frac{1}{2}\alpha\varepsilon_{\mathrm{f}}(\tilde{E}\cdot\tilde{E}^{*})\cdot\nabla T\right] \tag{5}$$

式中，T 是液体悬浮液温度，ω 是电场角频率，j 是虚数单位，$\tilde{E}$ 是电场向量振幅，$\tilde{E}^{*}$ 是 $\tilde{E}$ 的复共轭，α 是液体溶液介电常数的热扩散系数，β 是液体溶液电导率的热扩散系数，且有

$$\begin{aligned}\alpha&=\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{m}}}\left(\frac{\partial\varepsilon_{\mathrm{m}}}{\partial T}\right)=-0.004(k^{-1})\\ \beta&=\frac{1}{\sigma_{\mathrm{m}}}\left(\frac{\partial\sigma_{\mathrm{m}}}{\partial T}\right)=0.02(k^{-1})\end{aligned} \tag{6}$$

为了获得与温度相关的液体电学属性，应该在整个微电极系统中求解傅里叶热导方程[28]：

$$k\nabla^{2}T+\frac{1}{2}\sigma_{\mathrm{f}}(\tilde{E}\tilde{E}^{*})=0 \tag{7}$$

式中，k 为液体介质的导热系数，取值为 0.6 W/(m·K)；$\frac{1}{2}\sigma_{\mathrm{f}}\mathrm{Re}(\tilde{E}\tilde{E}^{*})$为焦耳热源。

低雷诺数不可压缩流体的稳态 Navier-Stokes 方程为[29]

动量守恒：

$$-\nabla p+\nabla[\eta(\nabla\mu+\nabla\mu)^{\mathrm{T}}]+\langle f_{\mathrm{et}}\rangle=0 \tag{8}$$

质量守恒：

$$\nabla\cdot\mu=0 \tag{9}$$

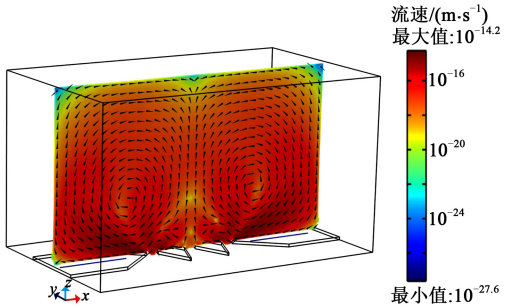
式中，p 为液体压力，μ 为流体的速度矢量。

在上述公式(5)中，如果令$\langle f_{\mathrm{et}}\rangle=0$，则

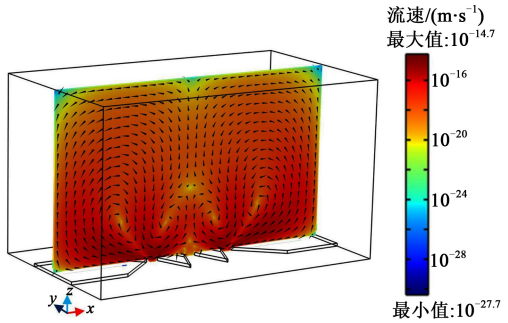
$$f_{\text{cross-over}}=\frac{\sigma_{\mathrm{m}}}{2\pi\varepsilon_{\mathrm{m}}}\sqrt{1-2\beta/\alpha}\approx 298\ \mathrm{kHz} \tag{10}$$

其中，$f_{\text{cross-over}}$ 表示临界的交叉频率[30]，流体受到的库仑力用 $\frac{\sigma_{\mathrm{m}}\varepsilon_{\mathrm{m}}(\alpha-\beta)}{\sigma_{\mathrm{m}}+\mathrm{j}\omega\varepsilon_{\mathrm{m}}}(\nabla T\cdot\tilde{E})\tilde{E}^{*}$ 表示，流体受到的介电力是 $0.5\alpha\varepsilon_{\mathrm{f}}(\tilde{E}\cdot\tilde{E}^{*})\cdot\nabla T$，两者作用在流体单元上的方向不同。在施加的频率较低时，流体单元的流动主要由库仑力控制，当施加的频率超过 $f_{\text{cross-over}}$ 之后，由介电力控制。

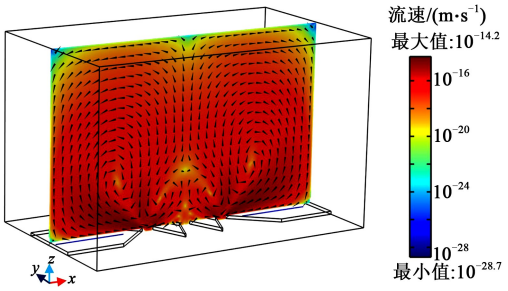
图 8 为施加三种不同频率时，截面上电热流的仿真结果。从图(a)中可以看出，施加频率为 150 kHz 时，在电极上方产生两个旋转的电热流对流漩涡，两个对流漩涡流向围绕导电岛之间的微间隙对称，在组装区域，流体朝下向导电岛和电极之间的微间隙流动，在电极表面上方，流体向外流动，这样就形成了两个循环的对流漩涡图案；当施加的频率为 500 kHz 时，即频率达到交叉频率，图(b)所示截面中电热流动发生反向，但电热流同样成左右对称分布，与 150 kHz 的情况相比，导电岛和电极的组装区，流体由内向外流动，在电极表面，电热流向里流动，同样产生了两个对流漩涡；除此之外，两个导电岛的组装区出现两个新的电热流对流漩涡，流体向下流动，组装区上面，流体由中间流向两侧；当施加的频率为 1 MHz 时，电热流的方向与 500 kHz 一



(a) 150 kHz 时电热流速分布



(b) 500 kHz 时电热流速分布



(c) 1 MHz 时电热流速分布

图 8 电热流速分布图

致，不过，电极尖端的效应更加明显，这主要表现在电极尖端与其他位置的电热流更快，如图(c)所示。

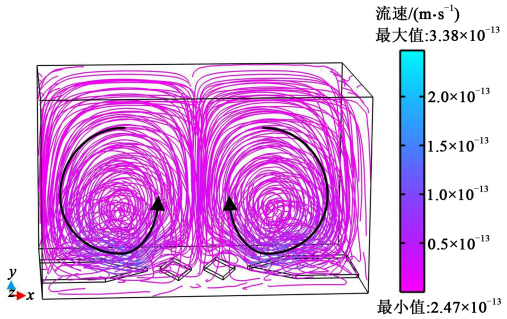
2.2.4　合场作用

在交流电动系统中，纳米线受到许多力的作用，包括 DEP 力、流体拽力、布朗运动、范德华力和电双层作用等。然而，在中高频环境下，交流电热流是影响纳米线介电泳组装的主要因素，最后纳米线的移动是在外部力(DEP 力)诱导的速度和流体输运综合作用的结果。

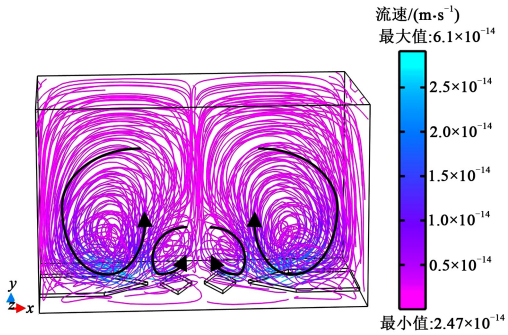
考虑 DEP 力和流体拽力的纳米线的移动速度可以表示为[31]

$$v=\frac{F_{\mathrm{dep}}}{6\pi\eta R}+u=\frac{RL\varepsilon_{\mathrm{m}}\mathrm{Re}[\widetilde{K}_{\mathrm{a}}]\nabla E_{\mathrm{rms}}^{2}}{12}+u \tag{11}$$

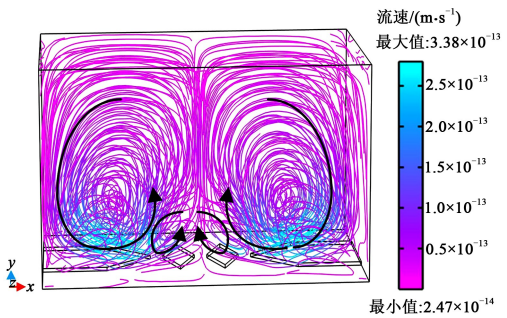
图 9 是施加三种不同频率时，在介电泳力和电热流合作用下速度流线仿真图。在流体区由电热流产生几个大的漩涡管控着远场区纳米线的运动行为。除此之外，这些流线连接着微米缝两端，把纳米线输送到微米缝附近，由于电极附近较强的电场梯度，使得纳米线受到正介电泳力的作用而被吸引至组装区和微米缝周围。



(a)　150 kHz 时合力作用的流速分布图



(b)　500 kHz 时合力作用的流速分布图



(c)　1 MHz 时合力作用的流速分布图

图 9　合力作用下的流速分布图

3　结论

在中高频的驱动频率下，基于平面微电极对和导电岛微电极系统中进行了纳米线的介电组装对比实验，结果表明，随着驱动频率的增加，纳米线的沉积数量也变多；当施加相同的频率时，纳米线在后者的组装中展现出更好的定向性。

通过仿真发现，只有当驱动频率在 1.6 MHz 以下时，才会产生正的介电泳力将纳米线俘获到微间隙；在此过程中，交流电热流对组装的结果也产生极大的影响，位于远场区域的纳米线是被电热流产生的漩涡输送到近场组装区域；当驱动频率到达翻转频率后，漩涡流向会发生反转。最后，通过合场作用下的流速分布说明纳米线的电动力学行为是近场区域的介电泳力与远场区域电热流共同作用引起的。

参考文献：

[1] Ashaju A A, Wood J A, Lammertink R G H. Electrocatalytic reaction induced colloidal accumulation: The role of dielectrophoresis[J]. The ACS J. of Surfaces and Colloids, 2022, 38(10): 3040-3050.

[2] Kim Daihyun, Sonker Mukul, Ros Alexandra. Dielectrophoresis: From molecular to micrometer-scale analytes[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(1): 277-295.

[3] Kim Hye Jin, Ahn Heeju, Kim Hongrae, et al. Nanoparticle-based multiplex biosensor utilising dual dielectrophoretic forces for clinical diagnosis of Alzheimer's disease[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2022, 355: 131288.

[4] Noh S, Song Y. Dielectrophoretic trapping for nanoparticles, highmolecule-weight DNA, and SYBR gold using polyimide based printed circuit board[J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(17): 18451-18458.

[5] Yao Limei, Cui Yan, Cong Haining, et al. Study of AC dielectrophoretic process of SiC nanowires: A universal method for alignment of semiconductor nanowires[J]. J. of Nanoscience and Nanotechnol., 2016, 16(4): 3925-3929.

[6] Núñez C G, Braña A F, López N, et al. Single GaAs nanowire based photodetector fabricated by dielectrophoresis [J]. Nanotechnology, 2020, 31(22): 225604.

[7] Li Wenshan, Hennrich Frank, Flavel B S, et al. Principles of carbon nanotube dielectrophoresis[J]. Nano Research, 2021, 14: 2188-2206.

[8] Song Z, Zhang Y, Zhang T, et al. Synthesis and UV photodetection properties of tungsten oxide nanowire arrays [J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(4): 62-66.

[9] Basuray S, Chang H-C. Induced dipoles and dielectrophoresis of nanocolloids in electrolytes[J]. Phys. Rev. E, 2007, 75(6): 060501.

[10] Boettcher M, Jaeger M S, Riegger L, et al. Lab-on-chip-based cell separation by combining dielectrophoresis and centrifugation[J]. Biophysical Rev. & Lett., 2011, 1(4): 443-451.

[11] Hermanson K D, Lumsdon S O, Williams J P, et al. Dielectrophoretic assembly of electrically functional microwires from nanoparticle suspensions[J]. Science (NY), 2001, 294(5544): 1082-1086.

[12] Liu W, Zhu J, Zhi W, et al. Fabrication and characterization of a novel wafer-level micro-electrode system for dielectrophoresis manipulation [J]. Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2010, 42(5): 1653-1658.

[13] Ding Haitao, Shao Jinyou, Ding Yucheng, et al. Effect of island shape on dielectrophoretic assembly of metal nanoparticle chains in a conductive-island-based microelectrode system [J]. Appl. Surface Science, 2015, 330: 178-184.

[14] 崔祥干, 丁海涛, 杜 山. 交流电热流对导电岛纳米电极介电组装的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(2): 127-136.
Cui Xianggan, Ding Haitao, Du Shan. Influence of AC electrothermal flow on dielectro-phoretic assembly in a conductive-island nanogap electrode system [J]. J. of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(2): 127-136.

[15] Yuan W, Yun Z, Meng C, et al. A high-response ethanol gas sensor based on one-dimensional TiO_2/V_2O_5 branched nanoheterostructures[J]. Nanotechnology, 2016, 27(42): 425503.

[16] Ding H, Shao J, Ding Y, et al. One-dimensional Au-ZnO heteronanostructures for ultraviolet light detectors by a two-step dielectrophoretic assembly method [J]. Acs Appl. Materials & Interfaces, 2015, 7(23): 12713-12718.

[17] Li Y, Chopra N. Structural evolution of cobalt oxide-tungsten oxide nanowire heterostructures for photocatalysis [J]. J. of Catalysis, 2015, 329: 514-521.

[18] Suehiro J, Nakagawa N, Hidaka S-i, et al. Dielectrophoretic fabrication and characterization of a ZnO nanowire-based UV photosensor[J]. Nanotechnol., 2006, 17(10): 2567.

[19] Shaalan N M, Kikuta T. Effect of micro-electrode geometry on NO_2 gas-sensing characteristics of one-dimensional tin dioxide nanostructure microsensors [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 156(2): 784-790.

[20] Peng Y, Lei J. Fabrication, electrical characterization, and detection application of graphene-sheet-based electrical circuits[J]. Nanoscale Research Lett., 2014, 9(1): 1-9.

[21] Vikram A, Agarwal V, Agarwal A. Lithography technology for advanced devices and introduction to integrated CAD analysis for hotspot detection[J]. IET Circuits Devices & Systems, 2017, 11(1): 1-9.

[22] 崔 铮. 微纳米加工技术及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 154-159.
Cui Zheng. Micro-Nanofabrication Technologies and Applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 154-159.

[23] Tao Q, Lan F, Jiang M, et al. Simulation study of dielectrophoretic assembly of nanowire between electrode pairs[J]. J. of Nanoparticle Research, 2015, 17(7): 1-11.

[24] Kumar S, Hesketh P J. Interpretation of AC dielectrophoretic behavior of tin oxide nanobelts using Maxwell stress tensor approach modeling[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2012, 161(1): 1198-1208.

[25] Zhou R, Chang H C, Protasenko V, et al. CdSe nanowires with illumination-enhanced conductivity: Induced dipoles, dielectrophoretic assembly, and field-sensitive emission[J]. J. of Appl. Phys., 2007, 101(7): 073704.1-073704.9.

[26] 郎 琦. 基于交流电热的微流体驱动与混合及其生物实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Lang Qi. Microfludic driving and mixing based on AC electrothermal and its biological experiments [D]. Harbin: Harbin Insitute of Technology, 2016.

[27] Sun H, Ren Y, Tao Y, et al. Combined alternating current electrothermal and dielectrophoresis-induced tunable patterning to actuate on-chip microreactions and switching at a floating electrode[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 304: 127397.

[28] Williams S J, Green N G. Electrothermal pumping with interdigitated electrodes and resistive heaters [J]. Electrophoresis, 2015, 36(15): 1681-1689.

[29] Salari A, Navi M, Dalton C. A novel alternating current multiple array electrothermal micropump for lab-on-a-chip applications[J]. Biomicrofluidics, 2015, 9(1): 014113.

[30] Lian M, Islam N, Wu J. AC electrothermal manipulation of conductive fluids and particles for lab-chip applications[J]. LET Nanobiotechnol., 2007, 1(3): 36.

[31] Khoshmanesh K, Chen Z, Tovar-Lopez F J, et al. Dielectrophoretic manipulation and separation of microparticles using curved microelectrodes [J]. Electrophoresis, 2010, 30(21): 3707-3717.

作者简介:

丁海涛(1979—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为微纳米加工技术。