www.scichina.com

tech.scichina.com



# 电液动力微泵的制作及实验研究

于翮\*, 俞坚, 马重芳

北京工业大学环境与能源学院,传热强化及过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室,北京 100124 \* E-mail: yuh@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2010-03-19; 接受日期: 2010-07-15 国家自然科学基金(批准号: 50676001)资助项目

摘要 提出一种基于 MEMS 加工技术的新型电液动力微泵,介绍了电液动力微泵的工作机理和分类; 从材料的选取,微电极的优化设计及电液动力微泵的封装工艺几方面介绍了电液动力微泵的制作过程; 进行了针对不同工作流体和微通道尺寸的电液动力微泵的静压力实验和流动试验. 实验结果表明: 当施加 90 V 驱动电压时,微泵最高能得到 268 Pa 的静压头,微泵驱动流体的最大流速可以达到  $106~\mu L/min;$  本文分析了微泵与热管相结合解决大功率电子芯片的散热问题前景,微泵所驱动的液体在热管的蒸发段完全气化,可实现的最大散热能力可达到  $87~W/cm^2$ .

**关键词** 电液动力效应 微机电 微泵 电子冷却

随着电子元器件不断微型化和功率密度不断增加,使得下一代电子元器件所需的散热功率大幅增加.目前高热流器件的散热功率已达 10<sup>6</sup> W/m² 的量级,下一代电子元器件的散热将超过 10<sup>7</sup> W/m². 现有的电子冷却技术无法满足电子器件所需的散热功率.众所周知,芯片表面的温度和其寿命是成反比的. 大功率电子芯片的散热问题已经成为微电子行业发展的一个瓶颈,也是目前电子器件封装和应用必须解决的核心问题<sup>[1]</sup>.

电液动力泵具有无运动部件、运行可靠、低耗、容易制作和无需维护等优点;并且可以直接同芯片或流道集成,无需独立空间;采用直流驱动,不产生附加磁场,不会干扰电子元件工作.电液动力微泵不仅被认是解决微电子行业中高热流器件的冷却问题的一个突破,还可以被运用在微流体冷却系统,药物输送和微机电系统等领域<sup>[2]</sup>.

电液动力泵的研究由来已久, 20 世纪 60 年代, 以 Sutter 和 Pickard 为代表的学者从理论到实验, 对电液动力泵进行了全面的研究[3~6]. 早期的电液动力泵所需的电压较高, 从几百伏到几十千伏, 如果想使电液动力泵有更好的性能和较低的工作电压就必须降低电极的间距. 但在当时的制作工业条件下, 小于毫米极的电极外形和间距的生产还是不可能的. 90 年代后, 随着 MEMS 技术的兴起, 研究人员将 MEMS和微加工技术引入电液动力微泵的设计制造, 使电液动力微泵的尺寸和外加电压都大大减小, 从而使电液动力泵的研究工作进入了微尺度领域[7~10].

本文运用 MEMS 微加工技术,设计制作了具有不同形状电极和流道高度的电液动力微泵.通过实验研究了电极材料形状、微泵结构和工作介质等各个因素对于电液动力微泵的性能影响,并分析了电液动力微泵的应用前途.

引用格式: Yu H, Yu J, Ma C F. Design, fabrication and experimental research for an electrohydrodynamic micropump. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 2839–2845, doi: 10.1007/s11431-010-4096-z

# 1 电液动力微泵机理与分类

电液动力学是研究电介质流体和电场之间相互作用的一门多学科交叉的科学领域,它主要考虑了电场对流体介质的作用,同时也可以被看作是运动介质中的电动力学<sup>[11]</sup>.在这一过程中,流体运动会对电场产生影响,而同时,电场也会对运动流体产生作用,这种相互作用促使流体运动,产生了多种运动形式:泵送,扰动和混合.进而在强化传热,电雾化和微泵等多个领域得到了广泛的运用<sup>[12,13]</sup>.

当施加一个电场于流场中,其流体所受到的力与电场的方程通过 Maxwell's equation 的推导得出:

$$\boldsymbol{F} = \rho \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P} \cdot \nabla \boldsymbol{E} - \frac{1}{2} \boldsymbol{E}^2 \nabla \boldsymbol{\varepsilon} + \nabla \left[ \frac{1}{2} \rho_d \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial \rho_d} \boldsymbol{E}^2 \right], \quad (1)$$

其中, F 为单位体积流体所受的力(force density),  $\rho$  为 电荷密度(charge density), E 为电场强度(electrical field), P 为极化向量(polarization vector),  $\varepsilon$  为介电常 数(dielectric constant),  $\rho_d$  为流体密度(density).

从(1)式可以看出,流体所受的电场力可以分为四大项.第一项( $\rho E$ )为库仑力(Coulomb Force),当流体中存在自由电荷,在外加电场作用下,电荷会根据电荷的正负,在库仑力的作用下,沿着(或逆着)电力线而运动.

第二项为极性力(Kelvin polarization force),通常也被称为介电泳力(Dielectrophoretic force),等于极化向量和电场强度的内积( $P \cdot \nabla E$ ).从表达式上可以看出,对于稳定的直流电场,这项会为零.对于不存在自由电荷的极性流体,流体中的偶极子通常会随机的分布在流体中,但是在外加电场作用下,这些偶极子的极向会被统一,从而产生极性力.

第三项为 Korteweg-Hemholtz force 等于电场强度平方和介电常数梯度的乘积, Korteweg-Hemholtz force 要求工作流体存在介电常数梯度. 在溶液中施加高频的行进波电压, 或液体中有温度梯度时, 电场中的工作流体就会产生介电常数梯度, 进而会被Korteweg-Hemholtz force 驱动.

第四项是 Electrostrictive force, 当施加外加电场于特殊高分子材料时候, 此特殊高分子材料会产生压力而变形. 通常情况下, 对于常规不可压缩流体这一项可以忽略不计.

按照起主导作用力的不同和驱动型式的不同,可以将电液动力泵分为3种不同类型:由库仑力起主导作用的注入型泵(injection pump),极性力起主导作

用的极性泵(Polarization Pump)和 Korteweg-Hemholtz force 起主导作用的非注入型或诱导泵(induction pump). 图 1 所示为电液动力泵的分类.

电液动力微泵(即离子拖曳泵)是通过电场与电介质流体中的电子,偶极子和微粒等相互作用而达到泵送流体的目的.如图 2 所示,微泵上设计加工了梳妆电极,在加电的发射极和接地的集电极间形成电场,注入电荷可以从超过约 100 kV/cm 的电位梯度下的从液体/电极界面得到[14].同时依靠库仑力来实现泵送机制——利用电场来"拖曳"离子,这样可以将它们的运动带动给大分子并且最终产生泵效应.

以图3所示的微泵平行电极为例,两个平行的平面电极分别是发射极和集电极,工作电压施加于两个电极上后,流体中的电荷就会按照电场方向移动. 电极所产生的泵送压力为

$$\Delta P_{g} = \int_{0}^{L} \rho E dx = \int_{0}^{L} \frac{\partial \varepsilon E}{\partial x} E dx = \frac{\varepsilon E_{L}^{2}}{2} - \frac{\varepsilon E_{0}^{2}}{2}.$$
 (2)

对于这种平行电极形式,理论上产生的最大压力为:

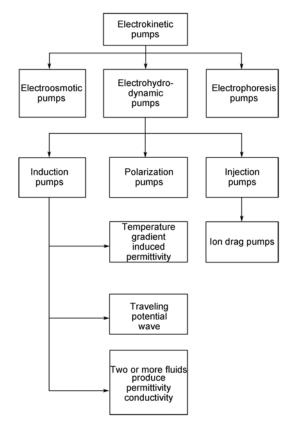


图 1 电液动力泵的分类

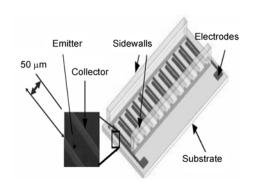


图 2 离子拖曳式电液动力泵的平行电极示意图

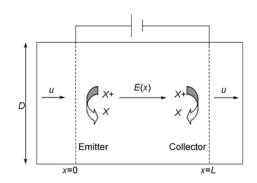


图 3 平行电极电场示意图

$$\Delta P_{\text{max}} = \frac{\varepsilon E_L^2}{2} = \frac{9}{8} \frac{\varepsilon V^2}{L^2}.$$
 (3)

本文所研究的电液动力微泵,流道的高度为 50~200 μm, 而电极的厚度远小于 1 μm, 近乎于平铺在流道底部; 可以看出实际的电液动力微泵的结构并不像图 3 所示的那种理想模型,需要加入一个修正因子 f 如下式所示:

$$f = \left[2/(3 - \sqrt{5})\right] d^{\frac{1 - \sqrt{5}}{2}}.$$
 (4)

另外, 考虑到实际微泵内的流体流动形式属于 层流, 所以电液动力微泵所驱动的流体之实际流速 的理论公式为:

$$u = \frac{\varepsilon f d^2 E^2}{12\eta},\tag{5}$$

其中,d为流道的高度, $\eta$ 为流体的黏度系数.

# 2 电液动力微泵设计制作

电液动力微泵在结构上由基板,有机玻璃盖板和环氧树脂垫片三部分组成.基板上加工梳妆电极, 在有机玻璃盖板上加工进出口.图4所示为电液动力

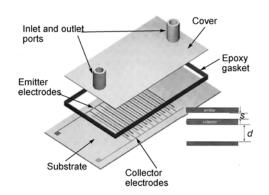


图 4 电液动力微泵结构示意图

微泵的结构示意图. 电液动力微泵的制作大致可分为基板的选择及处理、梳妆电极的加工和微泵的封装3个部分.

#### 2.1 基板的选择及处理

基板是梳妆电极的载体, 对于基板的要求是:

- (a) 基板必须具备良好的导热性能,良好的导热性能会降低传热过程中的误差;
  - (b) 基板应该是绝缘体, 其热容要尽量小;
- (c) 基板的线膨胀率要和所镀的金属膜以及热阻膜相差不大. 因为基板的膨胀率和镀膜金属的膨胀率相差过大, 会使得镀膜金属与基板之间发生脱落, 影响电液动力微泵的寿命.

本文选取单面抛光 100 面 N 型硅片作为基板材料. 硅基板采用的是电阻率 5~6 Ωcm, 厚度为 420±20 μm, 表面进行了氧化处理,然后再进行镀膜. 硅基板的优势在于技术比较成熟,加工工艺比较完善,可以大批量的生产,节约成本,同时还有利于后续试验中同电子元件的集成.

## 2.2 电极的加工

电液动力微泵的核心部分是采用 MEMS 加工工艺制作的微电极,微电极由成对的发射极和集电极组成.在电极对间的强电场作用下,电介质流体中的离子,偶极子以及微粒同电场的相互作用来驱动流体流动.在微电极的设计和制作中需要关注的三个关键问题是:电极材料的选择,电极形状设计和电极加工工艺.

在选择电极材料方面,需要综合考虑微泵的泵 送性能,制作工艺和具体运用环境.一般来说,电极 的材料可以是金属,半导体和绝缘体,有较好的抗腐 蚀性和较小的焦耳热; 贵金属(金,铂)具有较好的泵送性能和稳定的性能(表一所示),铜,铝等材料虽然在稳定性和泵送性能方面稍差,但是在加工方面却优于金等贵金属.

本文分别成功地采用铜,银和金作为加工材料来加工微泵电极(如图 5 所示),相关的实验结果也表明贵金属有更好的抗电化腐蚀能力和性能表现.同样,对于选择不同电极材料,也需要选择不同的绝缘层.

在电极结构方面;当选定了电极的材料后,电液动力微泵的驱动力决定于电极之间的电场.相关数值模拟研究证明:优化电极的结构和尺寸,可以使电极间的电场最大化,从而提升了微泵泵送性能<sup>[15, 16]</sup>.课题组通过两种方法来实现这一目的:减小发射极与集电极间的距离和加工锯齿状的电极.同普通平行电极结构相比,带有尖锐结构的电极更能提高微泵的性能(如图 6 所示).

在电极的加工中,分别试验了电镀工艺和剥离工艺两种工艺方法. 电镀工艺需要在基材上生成一层金属层,对基材有一定要求,而且会出现电极破裂和脱落的问题;而剥离工艺则在工艺控制和电极外形方面优于电镀工艺.

结果表明: 相比电镀工艺, 剥离工艺能更好的提高电极的制作质量, 工艺也更容易控制, 通过剥离工

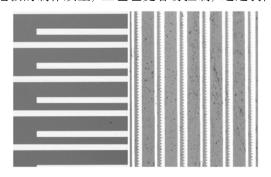


图 5 北京工业大学研制的金电极和银电极

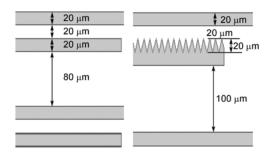


图 6 不同外形尺寸的电极

艺制作的电极线条质量要明显好于电镀工艺. 图 7 所示为剥离工艺的制作流程图.

#### 2.3 电液动力微泵的封装工艺

封装是 MEMS 加工过程中一个非常重要的环节, 封装的质量直接关系到器件的密闭性和可靠性. 在本实验中, 由于材料选择的特殊性, 试验中采用环氧树脂胶来密封硅片和有机玻璃盖板. 定制了三种厚度的环氧树脂垫片, 相应的微泵也具有 3 种不同高度的流道设计. 图 8 所示的电液动力微泵的外部尺寸为 13 mm×20 mm×8 mm.

# 3 基于电液动力微泵的冷却系统性能实验

基于电液动力微泵的冷却系统的性能试验分为静压力试验和流动试验两个部分.

## 3.1 电液动力微泵的静压力实验

电液动力微泵静压力试验是将微泵浸入玻璃皿内的工作流体中,在直流电压作用下进行微泵的静压力实验.实验需在等级为 100 清洁工作室中进行.如图 9 所示,为了测量微泵的静压力,使用环氧树脂胶将一个玻璃管固定在微泵出口端.实验时通过升

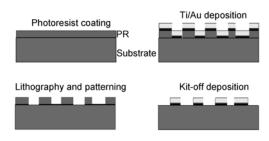


图 7 剥离法工艺流程图

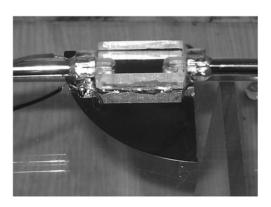


图 8 电液动力微泵实物图

高的液柱高度来计算微泵的静压力.

实验分别采用 HFE7100 和无水乙醇作为工作流体,进行静压力试验并得到如下结果.

首先,电液动力泵性能同电极材料有密切关系.在实验中,分别使用了较为常见的铜材料和贵金属金、银等贵金属来制作电极.正如表 1 所示,同铜相比,金具有较好的泵送性能和稳定性.试验结果表明,在相同的施加电压作用下,采用金电极的电液动力微泵静压头要远远大于铜电极(如图 10 所示).在 90 V电压下,采用金电极的微泵最大可以得到 268 Pa的静压力.

工作寿命一直是衡量微泵性能的一个重要指标. 图 11 所示为不同电极材料实验后的对比,从可以看出,相比金等贵金属,铜电极衰减明显,显示铜电极的稳定性较差,本身抗腐蚀性也比金等贵金属差.

其次, 微泵的静压力同施加电压及电极尺寸的关系. 从实验数据可以看出, 微泵的静压力同施加电压基本上呈二次曲线关系. 同时, 本次实验件的电极形式和尺寸同韩国 Ahn 的实验件相似, 只是电极间距和对电极间距是对方的一半, 把两者的结果做个比较, 从图 12 可以看出, 本次实验的效果要明显好, 说明电极间距同微泵的泵送压力呈反比关系.

再次,电液动力泵静压力同测试流体关系.电液动力泵的性能同流体的性质有密切的关系,通过实验可以发现电液动力泵对工作流体很敏感(参见图13),这说明工作介质的物性参数也是决定泵性能的

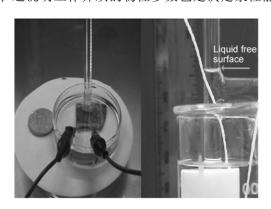


图 9 电液动力微泵静压力实验

表 1 常见几种金属功函比较

金属	Pt	Au	Cu	Al
电极势能(V)	1.18	1.69	0.52	-1.66
电极功函(EV)	5.65	5.1	4.7	4.28

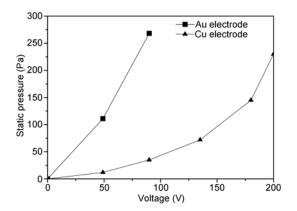


图 10 不同电极材料的微泵静压力

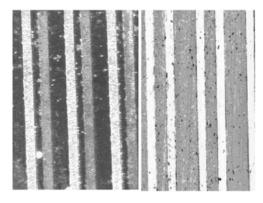


图 11 实验后铜电极和金电极的情况(左为铜电极)

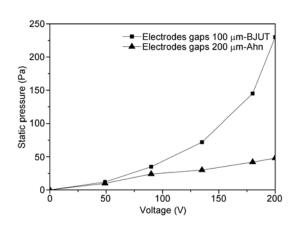


图 12 不同电极间距的电液动力微泵静压力比较

一个非常重要的因素,选择合适的流体可以提高整个 微泵冷却系统的性能.研究结果表明具有高介电常数 和低流体黏度的工作流体会产生更高的泵送压力<sup>[17]</sup>.

#### 3.2 电液动力微泵的流动实验

电液动力微泵的最大特点是可以不借助机械运

动来驱动流体. 如图 14 所示,课题组采用了开路设计,搭建测试系统,通过称重法来测试微泵驱动下的流体重量,进而测量测试液体的流速等各项性能参数. 由于电极之间的间距和流道高度很小,任何小的微粒都会造成短路. 整个实验安排在等级为100的洁净工作室内进行.

分别采用 100 μm 和 150 μm 厚环氧树脂垫片,采用硅片作为底板,加工两种电液动力微泵,测试流体采用无水乙醇.

考虑到实验流体流量较小,而实验又需要精确的测量,在试验中采用最基本但十分准确的称重法:采用高精密的电子分析天平来测量试验流体的变化,通过在线测量工质在实验时间(t)内的流量 G,并且计算出实验流体流量.

以无水乙醇为工作流体,得到流动速率同施加电压的变化关系如图 15 所示:可以看出流速随施加电压的平方成正比.在驱动电压为90 V时候,100 μm 高流道的微泵驱动流体的最大流速可以达到 106 μL/min,而 150 μm 高流道的微泵驱动流体得到的最大流速为 68 μL/min.

# 4 电液动力微泵-微型回路热管冷却系统的 最大冷却能力的分析

目前,针对控制大功率电子芯片的热能量问题. 国内外普遍采用的方法是通过改变基板材料、封装结构和其它辅助工具带走热量的方法来试图解决电子芯片的散热问题. 从实践情况看,现有的方法不能够有效地解决大功率电子芯片的散热问题.

相变冷却技术是高热流密度冷却发展的主要方

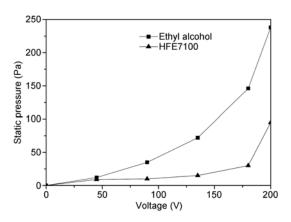


图 13 采用不同工作流体的电液动力微泵静压力

向之一,而热管是利用相变来强化换热的技术<sup>[18]</sup>.现有的微型回路热管技术(MLHP)具有传统热管的优点,但也存在循环缓慢,散热设计不能满足造型需求、毛细结构过于复杂难以制造等缺点.

如果将微泵与微型回路热管相结合,将微泵嵌 于环路热管的微型蒸发段与微型冷凝段之间,将冷 凝段的液体泵送到蒸发段,强化热管的性能.

如图 16 所示,整个冷却系统可以集成在电子芯片的背面,由电液动力微泵,回路热管,微通道,微型冷凝器等几部分构成;冷却系统通过电液动力微

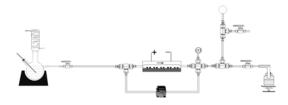


图 14 流动实验系统示意图

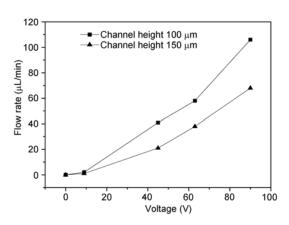


图 15 施加电压同无水乙醇流速关系图

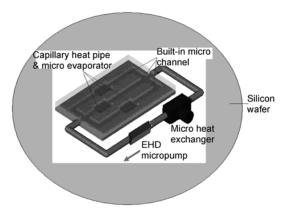


图 16 基于电液动力微泵电子冷却系统示意图

泵驱动冷却液,系统不存在运动的机械部件,毛细管内部也无需进行连接,从本质上提高了冷却系统的可靠性.

在此基础上可以尝试将微泵与微型和回路热管的蒸发段相结合,减小热管的体积和重量,使整个冷却系统能与微电子原件相匹配.

如果微泵所驱动的液体在热管的蒸发段能够完 全汽化, 计算可得到所能带走的热量密度为:

$$q = \frac{Q_e}{A_e} = \frac{mC_p dT + mL_r}{A_e}, \qquad (6)$$

其中, $A_e$  为微型回路热管蒸发端同芯片的接触面积  $(m^2)$ , $Q_e$  为微泵所驱动的冷却液体在热管蒸发段完全 汽化所带走的热量(J). m 是冷却液体流速(kg/s); $C_p$  是流体的热比容(J/kg~K);dT 是环境温度和流体沸点的温  $\pounds(K)$ ; $L_r$ 是工作流体的汽化潜热(J/kg).

以本文所研究的电液动力微泵的泵送能力和微型回路热管蒸发段的面积,可以估算出,当使用无水乙醇为工作流体时候,该冷却系统能实现的最大散热能力可达到87 W/cm².

# 5 结论

本文研究了一种基于 MEMS 加工技术的电液动力微泵,分析了电液动力微泵的工作机理及分类;从材料选取,电极结构优化,制作工艺等几个方面系统地介绍了电液动力微泵的制作过程;搭建了微泵性能实验台,针对不同结构尺寸的电液动力微泵,进行了静压力实验和流动试验.由实验结果可得到以下结论.

- (i) 电液动力微泵的性能同电极材料及工作流体性质有密切关系. 采用金等贵金属能得到更好的泵送性能和工作寿命, 采用具有高介电常数和低流体黏度的工作流体会产生高的泵送压力.
- (ii) 电液动力微泵的泵送压力同施加电压呈二次曲线关系,而同电极间距呈反比关系. 当施加电压为90 V 时,最高能得到 268 Pa 的静压头,100 μm 高流道的微泵驱动流体的最大流速可以达到 106 μL/min.
- (iii) 基于实验结果,分析了电液动力微泵与回路热管相结合解决大功率电子芯片的散热问题前景,微泵所驱动的液体在热管的蒸发段完全气化,可实现的最大散热能力可达到 87 W/cm².

#### 参考文献 \_

- 1 Garimella S V. Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics. Microelectronics J, 2006, 37: 1165—1185
- 2 Woias P. Micropumps-past, progress and future prospects. Sens Actuators B, 2005, 105: 28—38
- 3 Stuetzer O M. Ion drag pressure generation. J Appl Phys, 1959, 30: 984—994
- 4 Stuetzer O M. Ion drag pumps. J Appl Phys, 1960, 31: 136—146
- 5 Pickard W F. Ion drag pumping: I . Theory. J Appl Phys, 1963, 34: 246—250
- 6 Pickard W F. Ion drag pumping: II. Experiment. J Appl Phys, 1963, 34: 251-258
- 7 Richter A, Plettner A. An electrohydrodynamic micropump. Sens Actuators A, 1991, 29: 159—168
- 8 Ahn S H. Fabrication and experiment of a planar micro ion drag pump. Sens Actuators A, 1998, 70: 1-5
- 9 Yang L J, Wang J M, Huang Y L. The micro ion drag pump using indium-tin-oxide electrodes to resist aging. Sens Actuators A, 2004, 111: 118—122
- Darabi J, Rada M, Ohadi, M, et al. Design, fabrication, and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump. J Microelectromech Syst. 2002. 11: 684—690
- 11 Melchedr J B, Taylor G I. Electrohydrodynamics: A review for the role of interfacial shear stresses. Annu Rev Fluid Mech, 1969, 1: 111—146
- 12 陈效鹏,程久生,尹协振. 电流体动力学研究进展及其应用. 科学通报,2003,48(11):637—646
- 13 Cao J, Cheng P, Hong F P, et al. Applications of electrohydrodynamics and Joule heating effects in microfluidic chips: A review. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3477—3490
- 14 Castellanos A. Electrohydrodynamics. New York: Springer Wien, 1998. 41—43
- 15 Darabi J, Rhodes C. CFD modeling of an ion-drag micropump. Sens Actuators A, 2006, 127: 94—103
- 16 Lin C W, Jang J Y. 3D numerical micro-cooling analysis for an electrohydrodyanmic micro-pump. Sens Actuators A, 2005, 22: 167—176
- 17 Crowley J M, Wright G S, Chato J C, et al. Selecting a working fluid to increase the efficiency and flow-rate of an Ehd pump. IEEE T Ind Appl, 1990, 26: 42—49
- 18 Feng J T, Lin G P, Bai L Z, et al. Experimental investigation on operating instability of a dual compensation chamber loop heat pipe. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(6): 2316—2322