

静压驱动下微流体的流动特性*

吴昌聚[†] 金小军 金仲和 王跃林

(浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027)

摘要: 从微沟道的加工工艺出发, 建立了一套利用静压驱动微流体的测试方法. 该方法比较容易实现压差的恒定. 分析了不同因素如压差、工作流体类型、温度等因素对流体流动特性的影响, 既得到了一些和宏观流体相同的流动特性, 也得到了微流体所特有的流动特性. 这些结果不仅为理解微流体的流动特性提供了新的证据, 而且也利用微流体的某些流动特性制作器件提供了新的参考.

关键词: 微流体; 流动特性; 静压; 粘度

EEACC: 2520; 2575F

中图分类号: TH133. 31

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)05-0975-05

1 前言

由于 MEMS 技术的快速发展, 在过去的十几年里, 流体在微沟道中的流动引起了人们的广泛关注^[1]. 目前已有不少学者对此进行了研究, 并成功制作如微泵^[2,3]、微阀^[4]、微混流器^[5,6]等微流体器件. 此外, 微流体系统还可以用作集成电路的冷却系统^[7]. 已有一些研究人员发现, 流体在微沟道中流动时, 其某些流动特性明显偏离传统流体力学理论. 一些微流体器件就是利用这种有别于宏观流体的微效应制作而成. 但很多学者对出现这种偏离的原因基本上还处于猜测阶段, 尚缺乏足够的实验验证. 故尽管已经成功加工出一些基于微效应的微流体器件, 但是往往其工作效率不高, 在如何提高工作效率上也具有一定的盲目性. 因此了解微沟道中流体的流动特性, 对于设计微流体器件非常重要^[8,9].

本文从微流体的加工工艺出发, 建立了一套微流体的测试方法. 该方法采用流体的静压差作为流体流动的驱动力, 这种方法比较容易实现压差的恒定. 结果表明, 该方法简单而又切实可行. 此外, 还对流体的流动特性进行了详细的研究, 包括压差、工作流体类型、温度对流速的影响等. 既得到了一些和宏观流体相同的流动特性, 也得到了一些有别于宏观流体的流动特性.

2 实验

微沟道是在硅片上通过体硅加工得到的. 主要工艺包括三步: (1) 在如图 1(a) 所示的硅片上涂上光刻胶, 经过光刻后, 用 KOH 溶液刻蚀硅, 形成一个微沟道, 如图 1(b) 所示. 微沟道的深度可以通过刻蚀时间来控制. (2) 在微沟道的两端位置再次涂上光刻胶, 经光刻后再次用 KOH 溶液把硅片刻穿, 从而形成流体的入口和出

口, 如图 1(c) 和 (d) 所示. 图 1(c) 为俯视图, 图 1(d) 为 A-A 方向的截面图. 图 1(c) 所示的只有一条沟道, 而实际上为了增加流量, 在入口和出口之间有许多条平行的沟道. (3) 将事先加工好的耐热玻璃与硅片上表面通过键合的方法合在一起, 构成了完整的微流体沟道, 如图 1(e) 所示.

图 2 是微流体沟道的照片. 每条微沟道的宽度是 $20\mu\text{m}$, 深度是 $10\mu\text{m}$. 各条微沟道共用一个入口和出口. 图中的标尺可以用来观察流体开始在微沟道中流动时的流动前端, 标尺中每一大格刻度为 $100\mu\text{m}$, 最小刻度为 $10\mu\text{m}$.

图 3 是微流体测试系统示意图. 整个微流体测试系统可以分为三个部分: 恒压系统、微米沟道系统和辅助系统. Cheng 等人^[10]所建立的系统采用一个三通, 三通一端通过连接管道和沟道的入水口相连, 另外两段分别和注射器、压力表相连. 驱动流体运动的力由注射器产生. 这种系统的优点是可以透过压力表实时测量流体压力, 但是无法保证注射器提供的压力是恒定的. 此外,

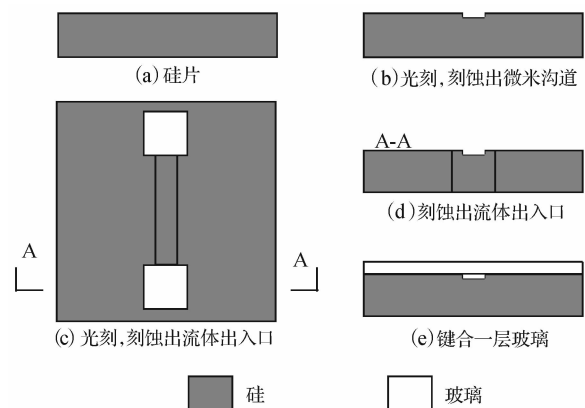


图 1 微流体沟道加工工艺

Fig. 1 Fabrication process of microchannel

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2006CB300405)

[†] 通信作者. Email: wuchangju@zju.edu.cn

2007-12-25 收到, 2008-01-25 定稿

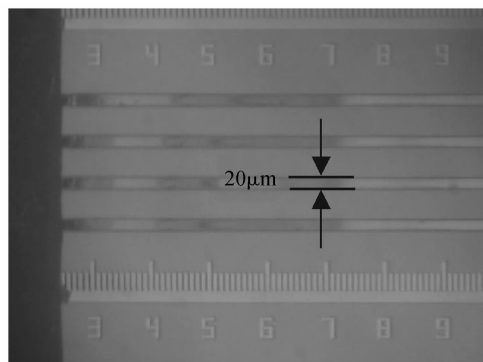


图 2 微沟道照片

Fig. 2 Photo of microchannels

流体的流量也受限制,其最大值就是注射器的体积.实际上,压力的产生可以不用注射器,完全可以通过流体的静压差产生,并且只要静压差保持不变,就可以使得入口处的压力保持恒定.保持压差不变的方法有许多,其中最简单的方法就是设法选取横截面面积大的容器,这样即使消耗掉一定量的流体,液面也几乎不会改变,而这一一定量的流体对于微沟道的测量来说已经足够多了.微米沟道系统则主要是按照图 1 所说的工艺加工的样品,包括沟道和流体出入口.辅助系统则包括塑料管道、针头和用于固定针头的加厚层.

3 结果与讨论

图 4 是流速和压差之间的关系曲线.所用的工作流体分别是去离子水、6%的 NaCl 溶液和油,实验温度为 295K.由于工作流体为油时其流速较小,为了在图中看起来更直观,将实验结果放大了 10 倍,但在实际分析时仍采用原来的实验值.图中符号表示各种条件下的实验值.对实验结果进行线性拟合,所得的拟合方程、直线的斜率和直线在 x 轴上的截距如表 1 所示.

从图 4 可以看出,流速几乎是随着压差的增加线性增加,即流体流动特性仍然满足 Poiseuille 定律^[10].这也从一个侧面说明了本文的流体流动仍然属于连续流.判断微流体流动是属于连续流、滑移流、还是分子流,可以用努森数 Kn 来确定:当 $Kn \leq 0.001$ 时,属于连续

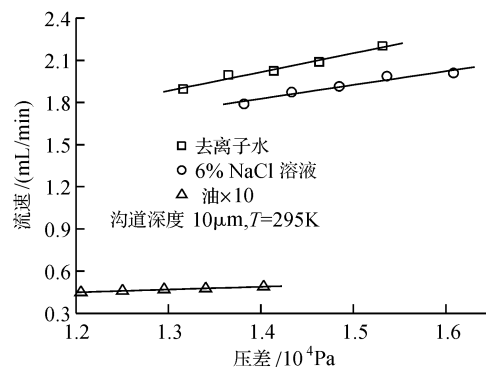


图 4 不同流体条件下流速和压差的关系

Fig. 4 Flow rate as a function of pressure with different fluids

流;当 $0.001 \leq Kn \leq 0.1$ 时,属于滑移流;当 $0.1 \leq Kn \leq 10$,属于过渡区;当 $Kn > 10$ 时,属于分子流^[11].为了进一步确定实验流体所属的区域,以去离子水为例,计算一下努森数.努森数的定义是分子平均自由程和特征长度的比值.查得水分子的平均自由程处于 0.1 nm ^[11].这样一个量级,算得微沟道的特征长度为 $13.3 \mu\text{m}$.算得努森数处于 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的量级,所以去离子水作为工作流体时所处的区域为连续流.

由于分子平均自由程和分子直径的平方成反比,而 NaCl 和油的粒子直径均大于水分子的直径,所以当工作流体是 NaCl 溶液和油时,其努森数更小,故也处于连续流区域.

以去离子水为例,对流体流动的雷诺数进行计算.对于非圆形截面管路,雷诺数定义为:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

式中 ρ —流体的密度, kg/m^3 ; V —流体的平均流速, m/s ; D_h —非圆形截面的当量直径, m ; μ —流体的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

去离子水的密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$,通过线性拟合得到 22°C 时的粘度为 $0.9606 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[12],微沟道的当量直径为 $13.3 \mu\text{m}$.当流速从 1.89 增加到 $2.20 \text{ mL}/\text{min}$ 时,雷诺数也从 137 增加到 160 .当工作流体是 NaCl 溶液和油时,由于其流速更小,粘度更大,故雷诺数要更小些.这个范围的雷诺数远小于临界雷诺数,所以流体的流态都处于层流状态.

本文所得到的实验结果和近期微管道流体所得的某些流动特性^[13,14]并不完全一致.出现这种现象的主要原因是流体的性质不同. Lee^[14] 和 Li 等人^[15] 所用的工作流体是氮气.一方面由于气体的可压缩性较大,会导致流速和压差的关系曲线向下弯曲;另一方面,由于氮气

表 1 不同工作流体条件下实验结果的拟合方程、斜率及在 x 轴上的截距

Table 1 Linear fits of flow rate with different fluids

流体类型	拟合方程	斜率	截距/Pa
去离子水	$y = 0.140 + 1.34 \times 10^{-4} x$	1.34×10^{-4}	-1.04×10^3
6% NaCl 溶液	$y = 0.453 + 9.81 \times 10^{-5} x$	9.81×10^{-5}	-4.62×10^3
油	$y = 2.10 \times 10^{-2} + 2.00 \times 10^{-6} x$	2.00×10^{-6}	-1.05×10^4

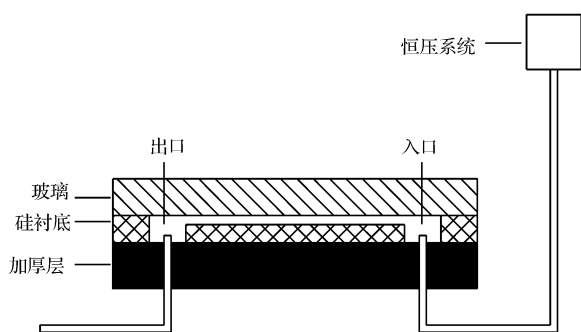


图 3 微流体测试系统示意图

Fig. 3 Schematic of the system to measure the flow rate of microfluid

表 2 不同流体在不同量级厚度沟道中的流速及流速比

Table 2 Flow rate and flow rate ratio in two scales channels with different fluids

流体类型	流速 / (mL/min)		流体在宏观沟道和在微沟道中的流速比
	宏观沟道	微沟道	
去离子水	12.3(13.3)	2.02(49.4)	6.1
6% NaCl 溶液	11.9(12.8)	1.83(44.7)	6.5
16% NaCl 溶液	11.5(12.4)	1.67(40.8)	6.9
油	0.93(1)	4.09×10^{-2} (1)	22.7

的分子平均自由程较大,故其努森数较大,由于大努森数产生的稀疏波效应又会导致流速和压差的关系曲线向上弯曲.稀疏波效应带来的影响要大于压缩效应带来的影响,综合结果使得流速和压差并不是线性关系,而是向上弯曲^[16].本文所用的工作流体是液体,故压缩效应和稀疏波效应均非常小,可以忽略.

当压差相等时,流速由去离子水、6%的 NaCl 溶液及油依次下降,原因为流体的粘度按照上述顺序增加.此外,如表 1 所示,拟合直线的斜率也是按照这个顺序依次下降,分别是 1.34×10^{-4} , 9.81×10^{-5} 和 2.00×10^{-6} .因为直线斜率的物理意义是:随着压强的增加,流速增加快慢的程度.这说明压强对去离子水和 NaCl 溶液流速的影响程度远大于对油流速的影响.由于去离子水和 NaCl 溶液的粘度较小,即流体所受的内摩擦较小,当压强增大时,即流体势能增加,此时势能会马上转化为动能,即流体流速快速增加.但对于粘度较大的油来说,由于内摩擦较大,损失了相当一部分能量,所以流速增加不明显.

从表 1 还可以看出,3 条直线都不经过原点,并且当流速为 0 时,压差为负值,即负压.当工作流体分别为去离子水、6%的 NaCl 溶液和油时,负压分别是 -1.04×10^3 , -4.62×10^3 和 -1.05×10^4 Pa.流体的这种负压是由于毛细管效应引起的^[10].毛细负压值较大,如对于去离子水、6%的 NaCl 溶液,负压是所加静压差的 1/10 左右,而对于工作流体为油,负压和所加静压是同一个量级.在沟道尺寸一定的条件下,毛细负压和液体的表面张力系数成正比.水的表面张力系数要大于油的表面张力系数,所以当工作流体分别是去离子水和油时,前者的毛细负压要大于后者,这和表 1 所示的结果相矛盾.出现这种现象的原因可以用双电层(electric double layer, EDL)^[17,18]效应来解释.双电层效应使得离子的向前运动受到限制,而衡量双电层效应强弱的特征量,即 Debye 长度,随着离子浓度的增加而减小.所以对于去离子水和 NaCl 溶液来说,由于前者浓度较小,故其双电层效应较强,引起毛细负压的明显减小.而当工作流体是油时,由于其是非极性流体,双电层效应不存在,所以对于毛细负压没有影响.由此可见,双电层效应在微沟道中影响非常大.而在宏观流体中,往往不会考虑双电层效应.

表 2 是不同流体分别在宏观沟道和微沟道中的流速及其流速比,括号里面的数是其他流体在沟道里的流速和油在该沟道中的流速之比.

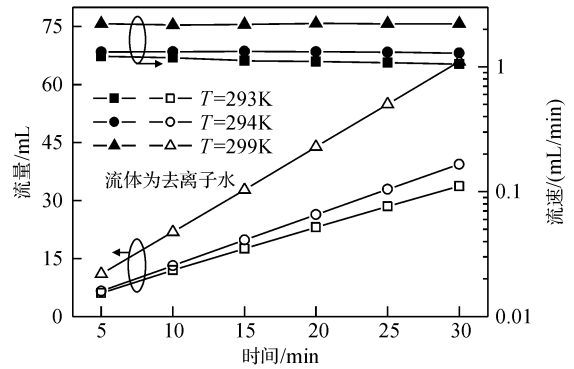


图 5 不同温度下流量、流速和时间的关系

Fig.5 Flow flux and flow rate as a function of time at different temperature The fluid is deionized water.

从表 2 可以看出,不同流体在同一沟道中的流速是不同的.如对于宏观沟道,按照去离子水、6% NaCl 溶液、16% NaCl 溶液和油的顺序,流速分别是 12.3, 11.9, 11.5 和 0.93 mL/min,呈逐渐下降趋势.原因已经在前面分析过,即粘度越大,流速越小. NaCl 溶液的粘度要比去离子水大,油的粘度又比 NaCl 溶液大.相同溶液,粘度又随着浓度的增大而增大.这条规律对于微沟道同样适用,如对于微沟道,流速按照上述流体的顺序分别是 2.02, 1.83, 1.67 和 4.09×10^{-2} mL/min.

尽管这两种不同量级的沟道均具有这种相同的规律,但是不同流体流速的差异在微沟道中比较明显,在宏观沟道相对不明显.由于油的流速最小,所以在各种尺度的沟道中都以油的流速作为标准,只要研究其他流体流速和油的流速比就可以.如在微沟道中,其他三种流体和油的流速之比分别为 40.8, 44.7 和 49.4;在宏观沟道中,这三个比值分别为 12.4, 12.8 和 13.3.出现这种现象的原因是:在宏观流体下,由于流体能够充分地向前流动,流体和沟道壁部的作用完全可以忽略,所以在外加压力恒定的前提下,流速只和流体本身的粘度有关.当沟道厚度降到微米量级时,沟道壁部的粗糙度会对流体有明显的减慢作用,并且这种作用随着粘度的增加而增大^[1].

换一种说法,尺寸效应对各种流体的影响是不同的.如宏观流体和微流体流速之比按照去离子水、6% NaCl 溶液、16% NaCl 溶液和油的顺序增加,分别是 6.1, 6.5, 6.9 和 22.7.这说明,当沟道尺寸从宏观尺寸下降到微米量级时,油的速率下降最明显, NaCl 溶液次之,去离子水相对最不明显.由于这四种流体是按照粘度增加的顺序排列的,所以也可以说随着粘度的增加,尺寸效应也就越发明显.

图 5 是不同温度下,去离子水在微米沟道中流量和流速与时间的关系.从图中可以看出,流量随着时间的增加几乎线性增加,这就说明流速几乎是恒定的,可以从流量随时间的关系得到印证.因此,整个实验装置的恒压系统的设计是合理的.图 5 还显示,温度越高,流速越大.这是因为粘度是温度的函数,随着温度的上升而下降.如对于温度分别是 20, 21 和 26℃,平均流速分

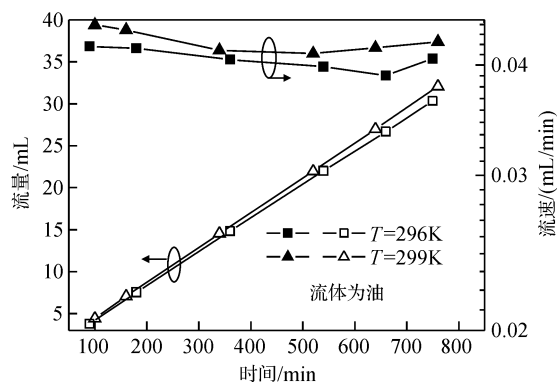


图 6 不同温度下流量、流速和时间的关系

Fig.6 Flow flux and flow rate as a function of time at different temperature The fluid is oil.

别是 1.124, 1.312 和 2.199 mL/min. 和第一个温度相比, 当温度分别上升 1 和 6°C 时, 平均流速分别增加 16.7% 和 95.6%.

温度对粘度的影响是由流体粘性的微观机制决定的: 液体的粘性主要由分子内聚力决定, 当温度升高时, 液体分子运动幅度增大, 分子间平均距离增大, 由于分子间吸引力随间距增大而减小, 使内聚力减小, 粘度相应减小.

图 6 是工作流体为油, 温度分别是 23 和 26°C 时流量和流速与时间的关系. 从图 6 可以看出, 在整个流动过程中, 流速稍微有些变动, 这和图 5 不同. 出现这种现象的原因是: 当流体是油的时候, 由于流速非常小, 故在一定时间内其流量较小, 这就导致存在微小测量误差就会引起流速的变动.

此外, 从图 6 还可以看出, 温度的改变对于油的流速变化相对不明显. 如, 当温度是 23.5°C 时, 平均流速为 4.06×10^{-2} mL/min. 当温度上升 3°C, 到 26.5°C 时, 平均流速为 4.26×10^{-2} mL/min, 增幅为 4.75%. 这可能原因是油分子的内聚力非常大, 小范围内的升温使得分子间平均距离增大效应并不明显, 所以粘度变化幅度也就较小.

4 结论

本文建立了一套微流体测试系统, 并对微流体的流动特性进行了研究, 实验结果表明: 流体的粘度对于流速存在阻碍作用, 故在相同尺寸的沟道中, 流速随着粘度增加而下降; 不同粘度的流体, 其流速的差异在微沟道中比较明显, 在宏观沟道中相对不明显; 流速随着压差的增大而增大, 并且基本上呈线性增加, 即微沟道中流体流动仍然符合 Poiseuille 定律, 但是流速增加的幅度则随着粘度的增加而逐渐减小; 毛细管效应和双电层

在微流体中占较大作用, 不能忽略; 温度的升高会引起流体粘度的下降, 从而导致流速的增加, 但是温度对各种流体流速的影响程度随着粘度的增加而减弱.

致谢 作者在此感谢上海微系统与信息技术研究所制作了实验样片.

参考文献

- [1] Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1999, 20:142
- [2] Jiang X N, Zhou Z Y, Huang X Y, et al. Micronozzle / diffuser flow and its application in micro valveless pumps. *Sensors and Actuators A*, 1998, 70:81
- [3] Nguyen N T, Huang X Y, Chuan T K. MEMS-micropumps: a review. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2002, 124:384
- [4] Feng Y Y, Zhou Z Y, Ye X Y, et al. Passive valves based on hydrophobic microfluidics. *Sensors and Actuators A*, 2003, 108:138
- [5] Johnson T J, Ross D, Locascio L E. Rapid microfluidic mixing. *Analytical Chemistry*, 2002, 74:45
- [6] Nguyen N T, Wu Z G. Micromixers—a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15:R1
- [7] Hsieh S S, Lin C Y, Huang C F, et al. Liquid flow in a micro-channel. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14:436
- [8] Hao P F, Yao Z H, He F, et al. Experimental investigation of water flow in smooth and rough silicon microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16:1397
- [9] Qu W L, Mala G M, Li D Q. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43:353
- [10] Cheng J T, Giordano N. Fluid flow through nanometer-scale channels. *Phys Rev E*, 2002, 65:031206/1
- [11] Zhou Shaoxiang, Hu Sangao, Song Zhiping. Investigation of metastable and theoretical superheat limit of liquid. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(6):917 (in Chinese) [周少祥, 胡三高, 宋之平. 流体亚稳定状态和理论极限过热温度. *工程热物理学报*, 2003, 24(6):917]
- [12] Qi Deqing. *Engineering fluid mechanics*. Shanghai: Tongji University Press, 1995 (in Chinese) [祁德庆. *工程流体力学*. 上海: 同济大学出版社, 1995]
- [13] Gad-ed-Hak M. The fluid mechanics of microdevices—the freeman scholar lecture. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121:5
- [14] Lee W Y, Wong M, Zohar Y. Pressure loss in constriction microchannels. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(3):236
- [15] Li X, Lee W Y, Wong M, et al. Gas flows in constriction microdevices. *Sensors and Actuators A*, 2000, 83:277
- [16] Ho C M, Tai Y C. Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and fluid flows. *Annual Review Fluid Mechanics*, 1998, 30:579
- [17] Mala G M, Li D Q, Dale J D. Heat transfer and fluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(13):3079
- [18] Ng E Y K, Poh S T. Modeling of electric double layer effects through pressure-driven microchannel flows. *CMES*, 2002, 3(3):351

Flow Characteristics of Fluids in a Microchannel Driven by Hydrostatic Pressure^{*}

Wu Changju[†], Jin Xiaojun, Jin Zhonghe, and Wang Yuelin

(*Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: Based on the fabrication process of a microchannel, a method to measure the flow characteristics of fluids in a microchannel driven by hydrostatic pressure is proposed. This method easily stabilizes the pressure. The effects of different factors such as pressure, type of working fluid, and temperature on the flow characteristics are analyzed. The results show that some flow characteristics of the microfluid are the same as the micro fluid, but some other flow characteristics are different from the micro fluid. These results provide not only new evidence to understand the flow characteristics of microfluid, but also new references to design devices using flow characteristics of microfluid.

Key words: microfluid; flow characteristics; hydrostatic pressure; viscosity

EEACC: 2520; 2575F

Article ID: 0253-4177(2008)05-0975-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2006CB300405)

[†] Corresponding author. Email: wuchangju@zju.edu.cn

Received 25 December 2007, revised manuscript received 25 January 2008