

# 表面镀金 SU-8 微柱的低频电动旋转特征<sup>\*</sup>

侯立凯<sup>1)</sup> 任玉坤<sup>1)2)†</sup> 姜洪源<sup>1)‡</sup>

1) (哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (浙江大学, 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

(2013年5月29日收到; 2013年7月24日收到修改稿)

依据传统 Maxwell-Wagner 界面极化理论, 金属微纳米粒子由于具有极高电导率, 在旋转电场作用下无明显电旋转运动. 然而, 本文针对镀金 SU-8 微柱开展实验研究, 发现镀金微柱在低频条件下的快速旋转运动现象. 据此, 通过考虑镀金微柱表面双电层效应, 理论分析并实验验证镀金微柱的低频电旋转特征. 首先, 建立电场中微柱的近似椭球模型, 分析固-液接触面双电层作用下的金属粒子极化机理, 推导旋转电场作用下镀金微柱的转矩公式及电旋转角速度公式. 其次, 搭建实验平台, 分别对镀金微柱在三种不同电导率溶液、100 Hz—30 MHz 频率范围内的电旋转特征进行对比实验研究. 最后, 对实验结果进行分析和讨论, 并通过考虑镀金微柱与基底之间摩擦作用等因素, 验证实验研究与理论研究的一致性.

**关键词:** 表面镀金微柱, 电旋转, 双电层, 微流控

**PACS:** 07.10.Cm, 47.57.jd, 83.10.Pp, 87.50.ch

**DOI:** 10.7498/aps.62.200702

## 1 引言

微纳米粒子的精确操纵是微流控研究的一项核心内容, 它对微流控研究涉及的样品快速检测、环境监测、生化反应等均具有重要意义<sup>[1]</sup>. 虽然机械、光镊、超声、磁场等技术也可以实现微纳粒子的精确控制, 但由于其微型化、集成化操作十分困难, 不能有效满足微流控系统的高效集成化等核心性能要求, 限制了其广泛应用. 基于交流电场的微纳粒子操纵技术, 如介电泳 (dielectrophoresis, DEP)、电旋转 (electrorotation, ROT) 等, 具有无移动部件、所需电压低、操作简单、易于集成、能满足诸多主动非接触式操作等优点, 非常适合分散于流体中的微纳米粒子的富集、分离、输运以及旋转等操作, 是芯片实验室研究中对粒子操控和特性分析的有效方法<sup>[2-8]</sup>. 传统研究中, 电旋转多用于细胞等非导体粒子的性质检测等领域, 如 Reichle 等<sup>[9]</sup>, Zimmermann 等<sup>[10]</sup> 分别对淋巴瘤细胞和蛋白质表达前后的人胚肾 HEK293 细胞进行了电旋转

操控以及介电特质和膜电容的检测研究, 并得出了理想的结果, 但是, 针对良导体微纳米粒子交流电场操纵机理的系统性研究却较为匮乏, 严重限制了其进一步发展与应用<sup>[11,12]</sup>. 与非导体粒子相比, 良导体粒子特别是金属粒子具有优异的光、电以及热力学性能, 它是微流控研究中多个分支的核心元件, 如微纳米导线的自组装、多种微纳米线的传感器研制以及光学微流控的检测等<sup>[13-17]</sup>. 因此, 针对作为良导体的金属微纳米粒子的交流电动性质研究, 对于拓展交流电动力学在微流控研究中的应用具有意义.

电旋转的物理本质是指置于溶液中的可极化粒子, 在电场作用下发生极化, 进而产生相应的偶极矩. 当施加电场为旋转电场时, 偶极矩与电场之间会有一个角度差, 使得偶极矩通过调整角度试图与电场方向保持一致. 但是, 电荷转移需要时间, 因此其变化率小于电场的变化速度, 进而产生旋转现象. 一般而言, 可极化粒子在交流电场作用下的旋转运动可由 Maxwell-Wagner (MW) 界面极化理论进行估计<sup>[2,6]</sup>. 对于单层球体结构, 其电旋转频

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51075087) 和浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金 (批准号: GZKF-201107) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: rykhit@hit.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: jhy.hit@sina.com

谱曲线通常只有一个峰值, 且峰值频率较高 (100 kHz—10 MHz). Grosse 和 Shilov<sup>[18]</sup> 在研究过程中, 发现了带电粒子在低频条件下 ( $\sim 100$  Hz) 的电旋转现象, 并且旋转方向与电场相同. 他们认为, 低频条件下, 电荷浓度的变化导致双电层的分布不均, 进而改变粒子周围的电场分布, 最终转矩及电渗流的综合作用导致带电粒子的低频电旋转现象. 然而, Ren 等<sup>[19]</sup> 对表面镀金微球进行的电旋转研究表明, 良导体微球在低频条件下的旋转方向与电场方向相反. 他们认为, 金属 - 溶液界面双电层的极化作用, 对于金属微球的电旋转起到决定性作用. 然而, 有关微球镀金前后的性质变化尚未进行细致的实验对比分析.

为验证镀金前后微粒的电旋转性质变化, 本文选取 SU-8 微柱作为研究对象, 实验验证并理论分析其镀金前后介电性质的变化. 选取 SU-8 微柱作为本文研究对象的主要原因为: 1) 柱形微粒的旋转特性容易观察和测量; 2) SU-8 最初作为微电子产业的光刻胶产品, 随后在微流控研究中的光刻工艺中发挥了极其重要的作用, 它的介电性质对于微流控的通道性质至关重要; 3) SU-8 具有较好的生物兼容性, 非常适合于生物微流控在生物医学等领域的应用研究<sup>[20]</sup>. 因此, 本文首先针对镀金微柱的基本受力特征展开分析, 研究金属 - 溶液界面区双电层效应对镀金微柱受力性质的主要影响, 并与传统 MW 界面极化理论的分析结果进行对比; 其次, 开展镀金和未镀金微柱的电动旋转实验研究, 对比镀金前后 SU-8 微柱的电旋转频谱特征, 并与理论结果进行对比分析; 最后总结双电层效应对镀金微柱电旋转特征的主要影响规律. 研究结果将为金属微纳米粒子的介电泳应用研究提供理论依据与实验参考.

## 2 表面镀金微柱的电旋转机理分析

一般而言, 为简化圆柱形颗粒的分析模型, 通常将其等效为椭球模型进行研究<sup>[21,22]</sup>. 图 1 所示为轴半径分别为  $a, b, c$  ( $a > b > c$ ) 且悬浮于溶液中的匀质椭球形微粒. 如果对系统施加交流电场  $\mathbf{E}_0$  ( $\mathbf{E}_0 = E_x \mathbf{x} + E_y \mathbf{y} + E_z \mathbf{z}$ ) 时, 粒子必然受到极化, 进而产生偶极矩, 偶极矩与电场的相互作用引起力的作用. 由动力学知识可知, 当其三个坐标轴其中之一与电场  $\mathbf{E}_0$  方向平行时, 椭球形粒子处于平衡状态. 然而, 当  $a$  轴 (即最长轴) 与电场  $\mathbf{E}_0$  方向平行

时才为最佳的平衡状态<sup>[6]</sup>. 因此, 一个自由悬浮的介电微球总是使自己的长轴趋于与施加的电场方向平行, 即椭球粒子在电场中的电导向作用. 如果外加电场为旋转电场, 微粒总是使自己的长轴与外加电场方向趋于平行, 就会以长半轴为半径做旋转运动. 其受到的转矩可以表示为<sup>[6]</sup>

$$(\mathbf{T}_{\text{ROT}})_z = -2\pi abc\epsilon_m \text{Im} [K_a + K_b] |\mathbf{E}_0|^2 z. \quad (1)$$

对于非导体介电材料而言, 其极化因子可依据 MW 界面极化理论确定, 即

$$K_\alpha = \frac{\tilde{\epsilon}_{p,\alpha} - \tilde{\epsilon}_m}{3[\tilde{\epsilon}_m + (\tilde{\epsilon}_{p,\alpha} - \tilde{\epsilon}_m)L_\alpha]} \quad (\alpha = a, b, c), \quad (2)$$

$$L_\alpha = \frac{abc}{2} \int_0^{+\infty} \frac{1}{(s + \alpha^2) \sqrt{(s + a^2)(s + b^2)(s + c^2)}} ds, \quad (3)$$

其中,  $\text{Im}[\cdot]$  代表虚部,  $|\mathbf{E}_0|$  为电场幅值,  $\epsilon_m$  为电解质的介电常数,  $\tilde{\epsilon}$  ( $\tilde{\epsilon} = \epsilon - j\sigma/\omega$ ) 为复合介电常数,  $\sigma$  为电导率,  $K_\alpha$  为各个轴向的极化参数 Clausius-Mossotti (CM) 因子,  $s$  为积分常数. 由 (1) 和 (2) 式不难看出, 其他外部条件不变的情况下, 匀质介电微粒的转矩主要由电解质和微粒本身的介电常数和电导率所决定.

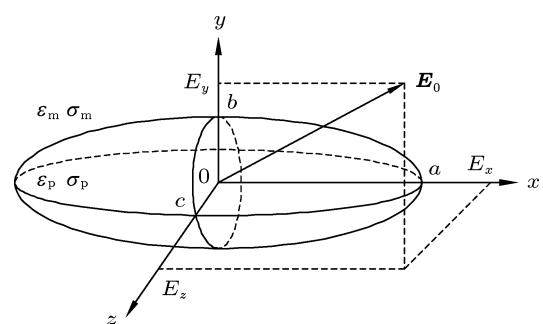


图 1 电场中椭球示意图

然而, 对于表面镀金后的微粒而言, 传统 MW 界面极化理论不能准确描述其介电性质<sup>[19]</sup>, 此时金属 - 溶液接触面的电致双电层 (electrical double layer, EDL) 效应至关重要<sup>[19,23]</sup>. 如果双电层厚度与粒子尺寸相比很小 (双电层厚度近似为 10 nm), 且溶液中的电场强度远小于感应电流产生的电场阈值, 则金属 - 溶液接触区的双电层在电场作用下其表现可类比为一个电容<sup>[2]</sup>, 其充电时间即双电层的弛豫时间  $\tau_{\text{RC}}$  ( $\omega_{\text{RC}} = 1/\tau_{\text{RC}}$  为双电层的弛豫频率) 则是一个关键参数. 因此, 当外加电场频率较低时 (远小于镀金微粒表面双电层的弛豫频率, 即  $\omega \ll \omega_{\text{RC}}$ ), 其表面双电层可被认为完全充电, 此时

溶液中的电场线在垂直于微粒表面的分量为 0, 即绕过微粒的表面, 如图 2(a) 所示, 微粒表现为绝缘特性; 而当频率较高, 即  $\omega \gg \omega_{RC}$  时, 双电层未充电, 溶液中的电场线将垂直穿入微球表面, 如图 2(b) 所示, 微粒的特征就相当于良导体。因此随着频率的变化, 表面镀金微粒在交流电场作用下的行为是由低频时的非导体向高频时的良导体之间的一个转化过程。

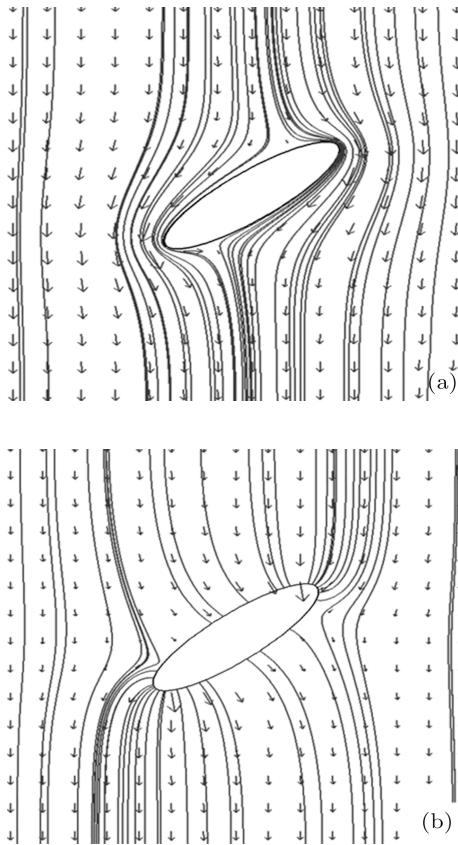


图 2 电场线分布图 (a)  $\omega \ll \omega_{RC}$ ; (b)  $\omega \gg \omega_{RC}$

考虑到镀金微粒表面双电层对其交流电动特性的影响, 以及球形表面镀金微粒电动学特性研究的相关文献 [19, 23], 椭球形良导体微粒的 CM 因子可以表示为

$$K'_\alpha = \frac{i\Omega_\alpha - 1/2}{(i\Omega_\alpha + 1)} \quad (\alpha = a, b, c), \quad (4)$$

式中,  $\Omega_\alpha$  为定义的无量纲量, 当  $\alpha = a$  时,  $\Omega_a = \omega C_{DL} b c / \sigma_m (b + c)$ 。由 (1), (2) 和 (4) 式不难看出, 其他条件不变的情况下, 作用在粒子上的转矩主要取决于 CM 因子的虚部。 $K'_a + K'_b$  的虚部值大于零时, 微粒受到与电场变化方向相反的转矩的作用; 相反,  $K'_a + K'_b$  的虚部值小于零时, 微粒受到与电场变化方向相同的转矩的作用。

图 3(a) 和 (b) 分别给出了匀质介电椭球形微粒和表面镀金椭球形微粒的 CM 因子虚部频谱。对比两频谱不难看出: 1) 表面镀金微粒的电旋转方向与电场变换方向相反, 并且存在一个角速度峰值点; 2) 表面镀金后微粒的电旋转峰值点所对应的频率远小于匀质介电微粒的电旋转峰值频率; 3) 表面镀金后微粒的 CM 因子虚部峰值比匀质微球大数十倍, 这表明在其他条件不变的情况下, 镀金后微粒的电旋转角速度峰值远大于匀质介电微球的电旋转角速度峰值。

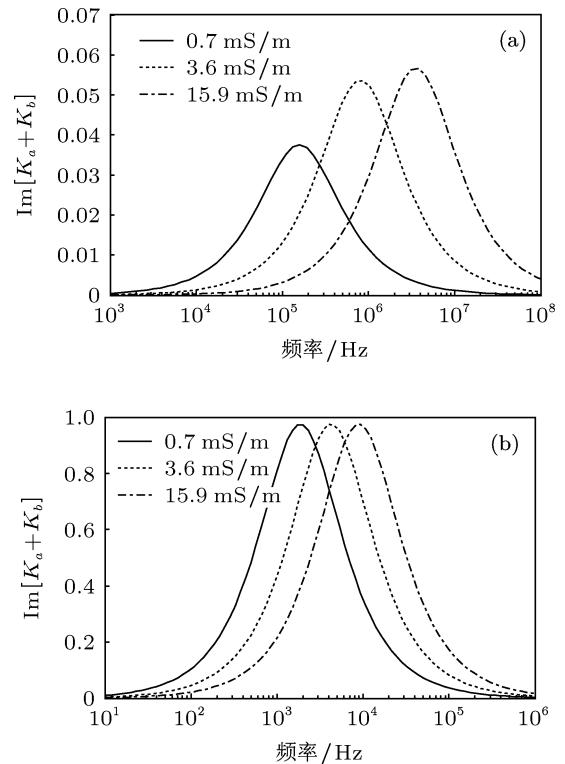


图 3 CM 因子虚部频谱 (a) 匀质椭球形微粒; (b) 表面镀金椭球形微粒

另外, 对于黏性溶液而言, 微米级粒子的电旋转必然产生与其旋转方向相反的黏性转矩的作用, 这一转矩取决于流体的黏性系数 ( $\eta$ ) 以及微粒的形状和表面性质。对于层流状的溶液而言, 椭球微粒以长半轴为半径做旋转运动所受到的黏滞阻力为 [24]

$$\mathbf{T}_f = -\frac{\pi\eta a^3}{3[\ln(2a/b) - 0.5]} \frac{d\theta}{dt}. \quad (5)$$

由稳态下的转矩平衡方程  $(\mathbf{T}_{ROT})_z = -\mathbf{T}_f$ , 以及 (1), (4) 和 (5) 式可以得到满足上述椭球条件的电旋转速度为

$$\omega_{ROT} = -\kappa \frac{3bc\epsilon_m [2\ln(2a/b) - 1] \text{Im}[K'_a + K'_b]}{a^2\eta}$$

$$\times |\mathbf{E}|^2 z, \quad (6)$$

式中  $\kappa$  为微柱与基底摩擦所引进的公式修正系数。因为表面镀金 SU-8 微柱的密度明显比溶液的密度大, 微柱会沉入溶液底部与玻璃基底接触, 微柱电旋转的过程中必然会产生动摩擦。此旋转速度公式为实验分析提供了理论基础。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 材料与方法

本实验中所用的 SU-8 微柱通过光刻法制备<sup>[21]</sup>, 其中 SU-8 是一种包含多种聚合物的光刻胶, 其能在厚度为 1  $\mu\text{m}$  到 100  $\mu\text{m}$  展开, 并且能利用光刻机有效校准对齐。本文中利用光刻法制得的 SU-8 微柱尺寸为直径 11  $\mu\text{m}$ , 长度 47  $\mu\text{m}$ , 如图 5(a) 所示。图 5(b) 所示为表面镀金后 SU-8 在光学显微

镜下的成像, 由于表面金层的不透光性, 微柱在视野内呈现黑色。

本文中 SU-8 微柱的表面镀金过程是通过化学反应实现的, 镀金流程如图 4 所示。首先, 通过化学反应的方式在 SU-8 微柱的表面修饰一层硫醇, 并利用参考文献 [25] 中的方法制备金纳米颗粒溶液和镀金溶液; 然后, 将上述反应后的 SU-8 微柱与金纳米颗粒溶液混合, 由于硫醇极易与金发生反应, 进而在 SU-8 微柱表面吸附金纳米颗粒; 最后, 以这些金纳米颗粒作为晶核, 利用镀金溶液使得金膜沿着晶核发散生长, 数小时后完成 SU-8 微柱表面镀金的全过程 (具体镀金实验参数同参考文献 [26])。

图 5(c) 所示为 SU-8 微柱镀金结束后, 利用 ZEISS EV L25 扫描电子显微镜 (SEM) 得到的表面镀金 SU-8 微柱的 SEM 图像以及其端面放大图。从图 5(c) 中可以看出, 表面金膜具有较好的完整性, 并且其厚度大约为 200 nm。

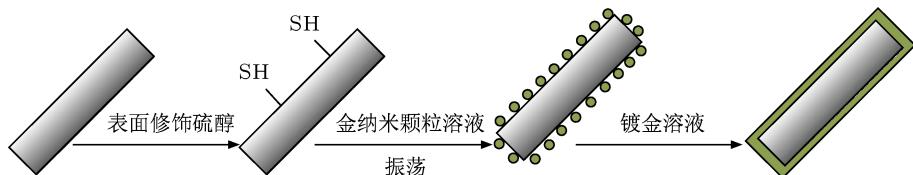


图 4 SU-8 微柱表面镀金过程示意图

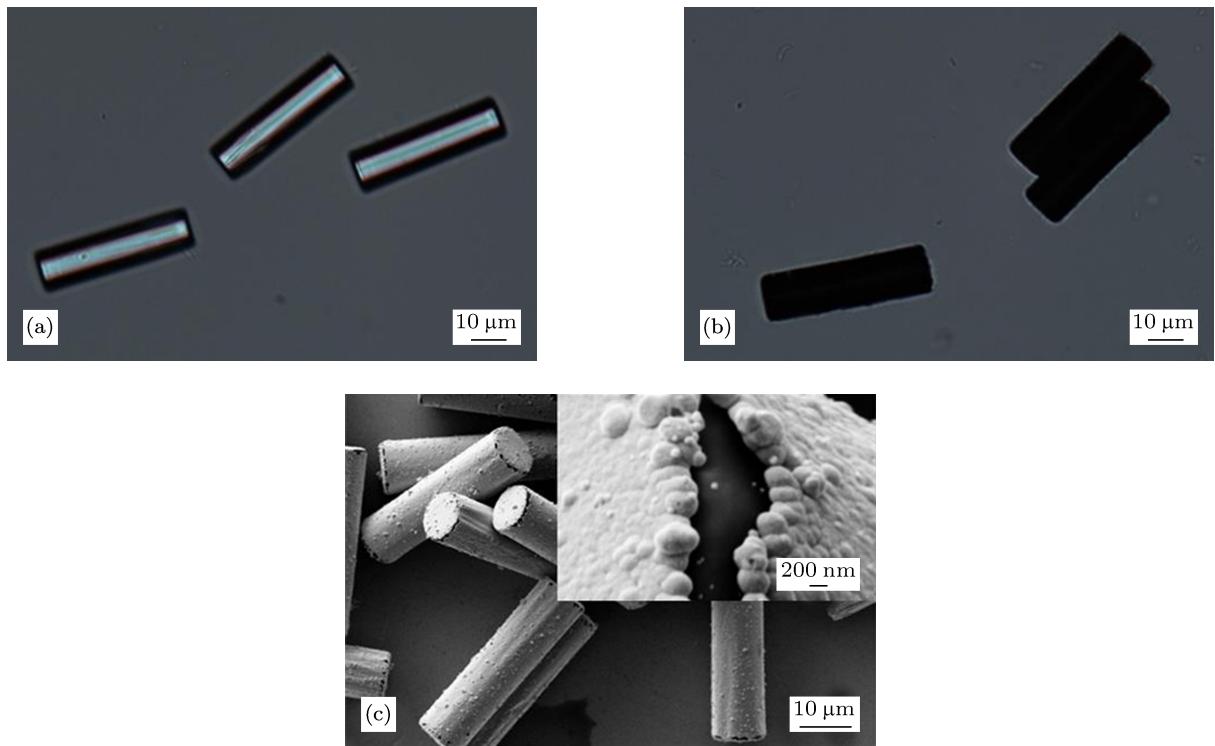


图 5 表面镀金前后的 SU-8 微柱 (a) 镀金前; (b) 镀金后; (c) 镀金后 SEM 图

基于理论基础, 以上述制得的表面未镀金和镀金后的 SU-8 微柱为操控对象, 通过信号发生器 (TTi TGA12104) 对四极星型电极施加相位差为  $90^\circ$  的四相电信号, 如图 6 所示. 电极中心区域可产生顺时针方向的旋转电场, 驱动粒子在电极中心区域做旋转运动.

实验时, 选取电导率分别为 0.7, 3.6 以及  $15.9 \text{ mS/m}$  的 KCl 溶液为电解质, 每组溶液各选择 20 个较理想的表面未镀金和镀金后的 SU-8 微

柱进行实验, 在显微镜 (Olympus BX53) 下利用光镊法将其推到电极的中心区域, 施加电信号, 通过 CCD (RET-2000R-F-CLR-12) 记录微柱在电场中的旋转运动. 图 7 给出了峰 - 峰值电压为  $7 \text{ V}_{\text{pp}}$ , 频率为  $10 \text{ kHz}$ , 电导率为  $3.6 \text{ mS/m}$  时, 表面镀金 SU-8 微柱的电动旋转实验录像帧图, 微柱做与电场方向相反的即逆时针的旋转运动, 这与理论分析的结果一致. 图 7 中时间分别为 0, 0.48, 0.96 以及  $1.44 \text{ s}$  时的微柱所处位置.

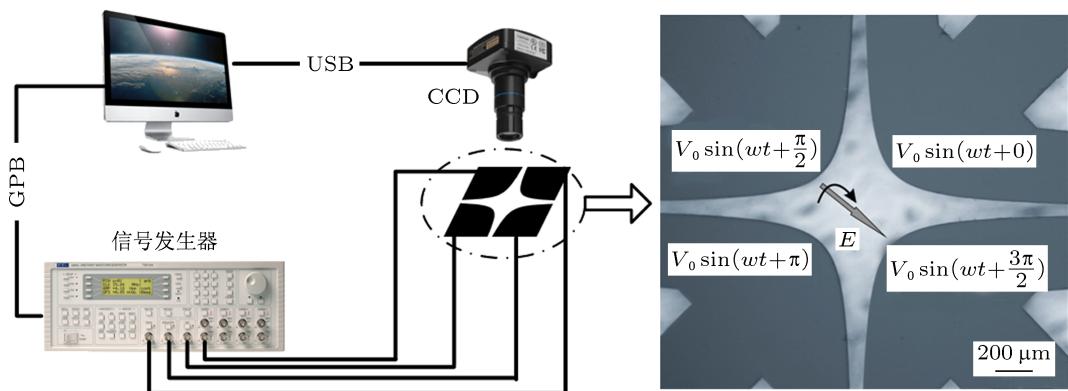


图 6 实验示意图

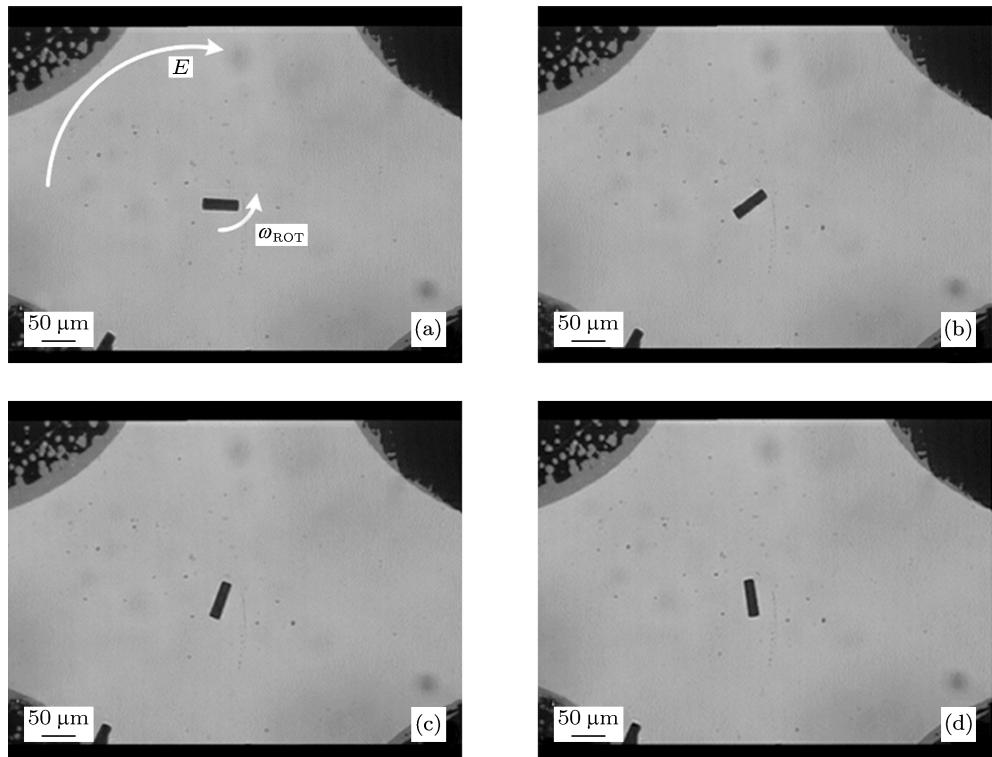


图 7 SU-8 电旋转实验视频截图 (a) 0 s; (b) 0.48 s; (c) 0.96 s; (d) 1.44 s

### 3.2 结果与讨论

利用 Adobe Premiere 软件将实验录像按帧打散, 并导入 ImageJ 软件进行旋转角速度的分析与计算. 每组实验从微柱运动的水平状态开始计时, 到微柱完成三周完整运动时结束, 根据时推计算微柱的旋转角速度, 并依次计算每组 20 个样本

的平均值及标准偏差. 图 8 和图 9 为溶液电导率分别为 0.7, 3.6 以及 15.9 mS/m, 频率为 100 Hz 到 30 MHz, 峰 - 峰值电压为 7 V<sub>pp</sub>, 电极间距 500  $\mu\text{m}$  条件下表面未镀金与镀金后 SU-8 微柱的电旋转角速度实验频谱, 其中实线为利用单一交界面的 Debye-Relaxation 方程进行拟合得到的拟合曲线.

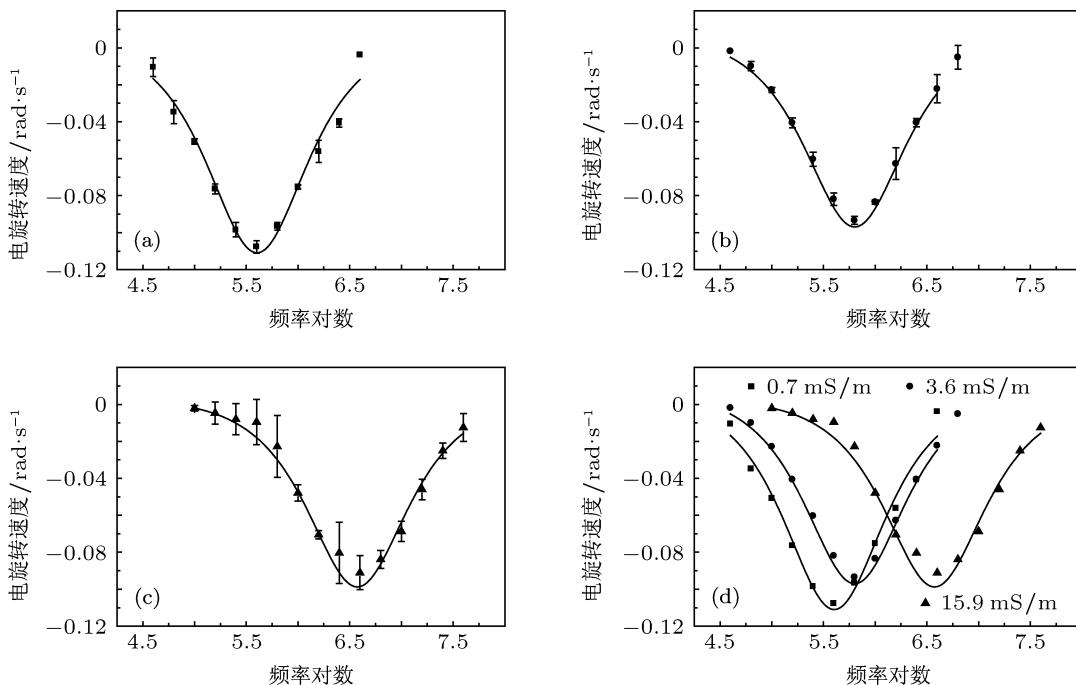


图 8 匀质 SU-8 微柱电旋转速度频谱 (a) 0.7 mS/m; (b) 3.6 mS/m; (c) 15.9 mS/m; (d) 不同电导率对比

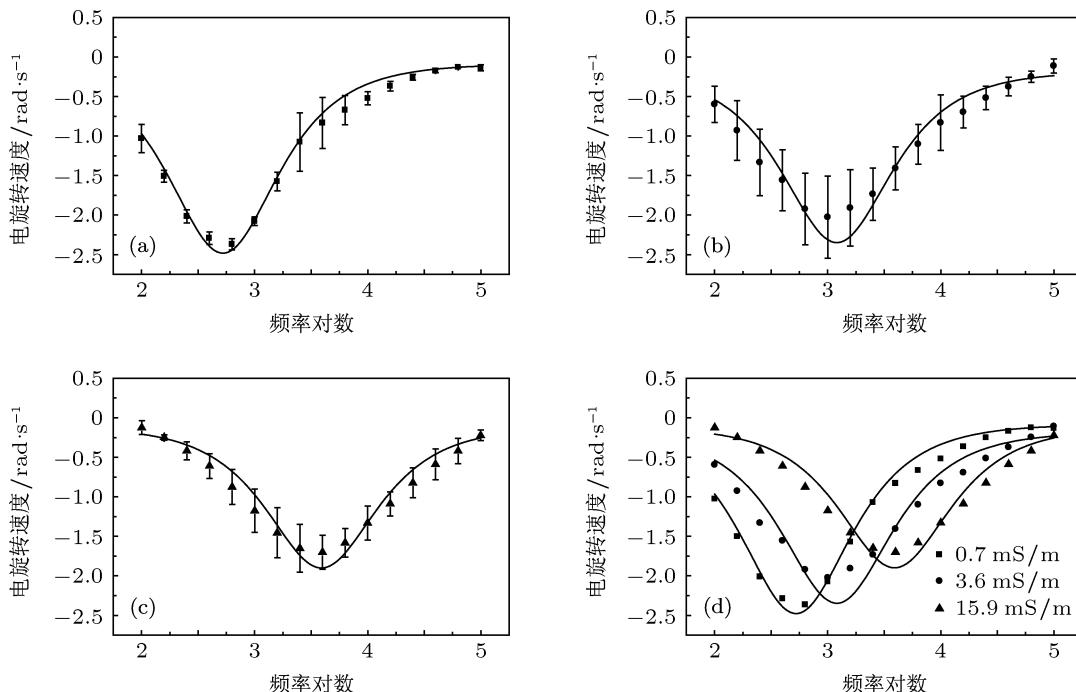


图 9 表面镀金 SU-8 微柱电旋转速度频谱 (a) 0.7 mS/m; (b) 3.6 mS/m; (c) 15.9 mS/m; (d) 不同电导率对比

从以上实验频谱可以看出,在本文实验频率范围内,表面未镀金与镀金后的 SU-8 微柱的旋转方向均与电场方向相反,且存在一个角速度峰值点,这与图 3 中 CM 因子的虚部频谱是相对应的。并且在电压峰-峰值为  $7 V_{pp}$  不变的情况下,交流电信号的频率值和溶液电导率对微粒电致旋转的影响非常显著, SU-8 微柱镀金前后的频谱也表现出明显差异。

根据图 8 和图 9 中的拟合曲线,给出了匀质 SU-8 微柱和表面镀金 SU-8 微柱的峰值点频率和峰值角速度如表 1 所示。对比表 1 中数据可知,对于表面未镀金的微柱而言,其电旋转峰值频率将出现在数兆赫兹,这与 Maxwell-Wagner 表面极化机理是一致的<sup>[6]</sup>,实验结果也证明了这一点。然而,镀金后的 SU-8 微柱的电旋转峰值速度点出现在千赫兹频率范围内,并且峰值频率点所对应的电旋转速度较大,较匀质微柱的峰值点速度大出数十倍之多。这主要是由于低频条件下镀金后微柱的金层与电解质交界面能够形成较为明显的双电层,如图 2(a) 所示,成为镀金微柱电动学特性的主要影响因素,使得镀金微柱在较低频率下有着相对较高的电旋转速度,充分说明了镀金微粒与匀质微粒极化机理的不同。

表 1 峰值频率、峰值角速度对比

$\sigma_m/mS \cdot m^{-1}$	$f_{native}/kHz$	$f_{gold}/kHz$	$\omega_{native}/rad \cdot s^{-1}$	$\omega_{gold}/rad \cdot s^{-1}$
0.7	401.80	0.52	-0.12	-2.48
3.6	633.84	1.20	-0.10	-2.35
15.9	3749.43	3.89	-0.09	-1.90

注:  $\sigma_m$  为溶液电导率,  $f_{native}$ ,  $\omega_{native}$  为匀质微柱的峰值频率和峰值角速度,  $f_{gold}$ ,  $\omega_{gold}$  为表面镀金微柱的峰值频率和峰值角速度

除此之外,对比图 9(d) 和图 3(b) 可以明显地看出,实验得出的表面镀金 SU-8 微柱的旋转角速度峰值点频率较理论分析得到的峰值点频率在坐标轴上有一定的左移,根据(4)和(6)式以及定义的无量纲量  $\Omega_\alpha$ ,在溶液电导率恒定的情况下,当  $\Omega_\alpha$  为某一固定常数时,微柱的旋转角速度达到最大值。由于本实验中镀金微柱表面金层的粗糙程度较大,如图 5(c) 所示,使得金层表面的诱导双电层的电容值  $C_{DL}$  较理论分析时大,在  $\Omega_\alpha$  为常数的情况下,所对应的弛豫频率值  $\omega$  则会减小。

## 4 结 论

微流控系统中微粒的电旋转操控是操纵和表征粒子特性的一种有效方法。本文分别以电致极化转矩、电致双电层理论为基础,进行了转矩作用下表面镀金柱形微粒的旋转运动分析,定性分析了表面双电层作用下表面镀金微粒的旋转机理。在此基础上,以直径 11  $\mu m$ , 长度 47  $\mu m$  的表面镀金和未镀金 SU-8 微柱为操控对象,进行了不同溶液电导率、不同频率下的电旋转实验研究。结果表明,在低频条件下,镀金微柱的旋转特性显著,并且存在旋转峰值点,其表面双电层在低频条件下对表面镀金微粒这类良导体微粒的交流电动特性起主导作用。后续研究中,将对表面镀金微柱的金层表面进行修饰,利用其在低频条件下的电导向、电旋转等行为特性进行微机电系统中微载体以及药物输送等方向的研究。

感谢浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室付新教授在论文立意上的建设性意见。

- [1] Ren Y K, Ao H R, Gu J Z, Jiang H Y, Antonio R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7869 (in Chinese) [任玉坤, 敖宏瑞, 顾建忠, 姜洪源, Antonio R 2009 物理学报 **58** 7869]
- [2] Morgan H, Green N G 2003 *AC Electrokinetics: Colloids and Nanoparticles* (Beijing: Higher Education Press) p119
- [3] Morales M C, Lin H, Zahn J D 2012 *Lab. Chip.* **12** 99
- [4] Zhu X L, Yin Z F, Gao Z Q, Ni Z H 2010 *Sci. China: Tech. Sci.* **53** 2388
- [5] Yasukawa T, Suzuki M, Shiku H, Matsue T 2009 *Sens. Actuator. B: Chem.* **142** 400
- [6] Jones T B 1995 *Electromechanics of Particles* (New York: Cambridge University Press)
- [7] Desai A, Lee S W, Tai C Y 1999 *Sens. Actuator. A: Phys.* **73** 37
- [8] Reichle C, Muller T, Schnelle T, Fuhr G 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 2128
- [9] Zimmermann D, Zhou A, Kiesel M, Feldbauer K, Terpitz U, Haase W, Schneider Hohendorf T, Bamberg E, Sukhorukov V L 2008 *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **369** 1022
- [10] Reichle C, Muller T, Schnelle T, Fuhr G 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 2128
- [11] Jiang H Y, Ren Y K, Han X J, Tao Y, Li S S 2011 *Sci. China: Tech. Sci.* **54** 643
- [12] Hermanson K D, Lumsdon S O, Williams J P, Kaler E W, Velev O D 2001 *Science* **294** 1082
- [13] Ren Y K, Tao Y, Hou L K, Jiang H Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 087701
- [14] Jiang H Y, Ren Y K, Tao Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 057701
- [15] Mayya K S, Schoeler B, Caruso F 2003 *Adv. Funct. Mater.* **13** 183
- [16] Lim J K, Eggeman A, Lanni F, Tilton R D, Majetich S A 2008 *Adv.*

Mater. **20** 1721

- [17] Gangwal S, Gayre O J, Bazant M Z, Velev O D 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 058302
- [18] Grosse C, Shilov V N 1996 *J. Phys. Chem.* **100** 1771
- [19] Ren Y K, Morganti D, Jiang H Y, Ramos A, Morgan H 2011 *Langmuir* **27** 2128
- [20] Lorenz H, Despont M, LaBianca N, Renaud P, Vettiger P 1997 *J. Microelectromech. Microeng.* **7** 121
- [21] Morganti D, Morgan H 2011 *Colloid. Surf. A: Phys.* **376** 67
- [22] Rose K A, Meier J A, Dougherty G M, Santiago J G 2007 *Phys. Rev. E* **75** 011503
- [23] García-Sánchez P, Ren Y K, Arcenegui J J, Morgan H, Ramos A 2012 *Langmuir* **28** 13861
- [24] Minoura I, Muto E 2006 *Biophys. J.* **90** 3739
- [25] Jiang H Y, Ren Y K, Tao Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 010701 (in Chinese) [姜洪源, 任玉坤, 陶冶 2011 物理学报 **60** 010701]
- [26] Ren Y K 2011 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [任玉坤 2011 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]

# Electrorotation characteristics of gold-coated SU-8 microrods at low frequency\*

Hou Li-Kai<sup>1)</sup> Ren Yu-Kun<sup>1)2)†</sup> Jiang Hong-Yuan<sup>1)‡</sup>

1) (School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

2) (State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 29 May 2013; revised manuscript received 24 July 2013)

## Abstract

According to the theory of traditional Maxwell-Wagner interface polarization, the metal micro/nano particles have no obvious electrorotation behavior under the alternating current electric field. However, we find the opposite experimental results. In this paper, electrorotation experiments are carried out, and the basic mechanism of gold-coated SU-8 microrods is presented. Therefore the electrorotation characteristics of gold-coated microrod at low frequency are analysed by considering the surface electric double layer at the microrod-electrolyte interface. Specifically, first we establish an approximate ellipsoid model in the electric field, analyze the polarization mechanism of metal particles under the action of solid-liquid interface electric double layer, and then calculate the electrorotation torque and present an electrorotation angular speed formula of the gold-coated microrod. Secondly, electrorotation experiments of gold-coated SU-8 microrods suspended in electrolytes with different conductivities are presented in a frequency range of 100 Hz to 30 MHz. Finally, the experimental results are discussed, and compared with the theoretical analysis, showing the experimental results are in good agreement with theoretical analyses by considering the friction between the microrods and substrate.

**Keywords:** gold-coated microrod, electrorotation, electrical double layer, microfluidics

**PACS:** 07.10.Cm, 47.57.jd, 83.10.Pp, 87.50.ch

**DOI:** 10.7498/aps.62.200702

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51075087) and the State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control of Zhejiang University, China (Grant No. GZKF-201107).

† Corresponding author. E-mail: rykhit@hit.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jhy\_hit@sina.com