

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656231

研究課題名(和文) 誘電泳動を用いた微粒子操作のためのモデリングと最適微粒子構造の探索

研究課題名(英文) Modeling and Optimization of Microparticle Structure for Dielectrophoresis Manipulation

研究代表者

松岡 俊匡 (Toshimasa, Matsuoka)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80324820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：誘電泳動を微粒子操作に応用する上での高精度な微粒子モデルが必要となる。溶液中で微粒子表面に電気二重層が形成されることを考慮したモデルを考案した。このモデルを用いることで、ポリスチレン粒子等の誘電泳動の周波数特性を定性的に説明できることを示した。また、オンチップ微粒子操作での発熱などによる溶液の温度上昇を解決するために、非接触給電と誘電泳動駆動信号の周波数を分離した回路構成を開発した。オンチップ発振回路を搭載することで、適切な誘電泳動駆動低周波信号を生成できると同時に、AC給電周波数を高くすることで、非接触給電の効率を向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：For microparticle manipulation using dielectrophoresis (DEP) phenomenon, precise model of the microparticle is required. In medium, the electrical double layer is formed on the surface of the microparticle. The microparticle model including the electrical double layer can explain the measured frequency dependence of DEP for the polystyrene microparticles and so on. In addition, to avoid heating from the DEP chip, a circuit with different frequencies for the DEP and AC wireless power transfer has been developed. It has on-chip oscillator for the adequate low-frequency DEP driving signal, and improves the wireless power transfer with higher frequency.

研究分野：半導体デバイス，半導体集積回路

キーワード：センシング

1. 研究開始当初の背景

半導体集積回路と複数の化学センサとの融合によるスマート・センサの作製では複数のセンサ材料を所望の位置に形成する必要があるが、従来のリソグラフィとエッチングによる技術のみでは、混載できるセンサの種類に限界がある。そこで、不均一交流電界中において液体中の粒子が分極し、電界強度が強い方向もしくは弱い方向へ泳動する現象、誘電泳動(Dielectrophoresis)に着目した。従来より誘電泳動を用いて微粒子を電気的に操作する試みがなされているが[1]、これは半導体集積回路に代表される微細加工技術を基盤としており、微粒子制御電極と制御・センシング用回路を集積化することにより、DNA 分析など従来大掛かりな装置でないと計測できなかった現象がコンパクトな装置で計測できる。このように、微粒子制御可能な“Lab-on-a-Chip”技術は、評価・分析技術への応用が期待されている。

この着想に基づき、研究代表者は図1に示すような“自己整合微粒子操作支援回路”を開発した[2]。CMOS 技術を用いて誘電泳動微粒子操作を可能とする回路を集積化し、液中での非接触低電圧動作オンチップ微粒子操作を実現している。集積回路チップの特長は、液中動作、外部配線不要、パルス駆動誘電泳動などがある。コイルによる磁界誘導方式で供給された交流信号は、整流回路により直流電圧に変換される。この直流電圧を誘電泳動用駆動回路の電源電圧とする。四重極電極に駆動信号を送ることで不均一電界を形成し誘電泳動を誘起する。

微粒子にセンシング特性を与えたり、センサ分子と結合したキャリアとしての役割を微粒子に与えて、この技術を適用すれば、所望の位置に形成した四重極電極に対して自己整合的に所望のセンサ材料を形成することが実現できる。

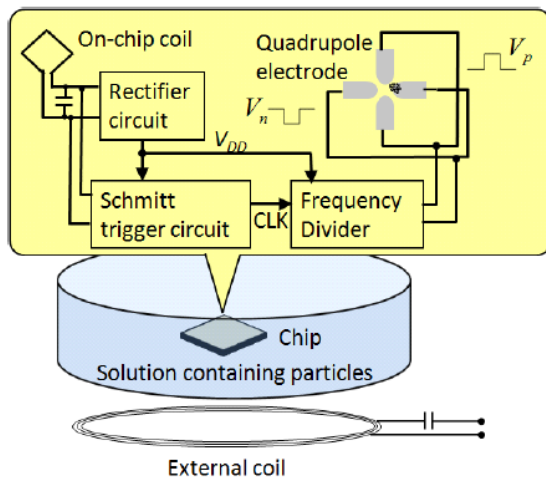


図1 自己整合微粒子操作支援回路[2]

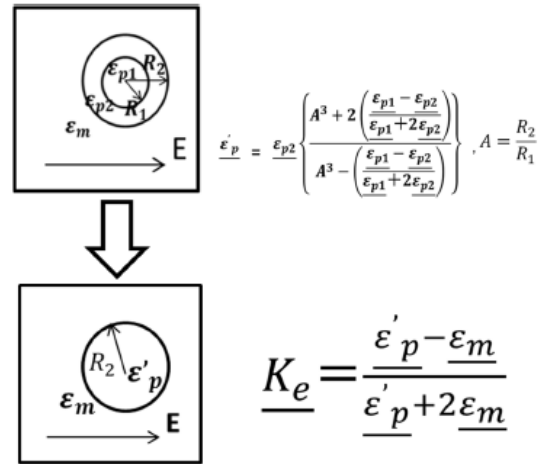


図2 二層構造微粒子の単層構造微粒子への等価変換

2. 研究の目的

本研究では、上記技術の実用化のために、固液界面まで考慮した、溶液中の微粒子の詳細なモデルの提案、及びこのモデルを通して様々な用途に適した微粒子構造の探索し、「自己整合微粒子操作技術」の基盤を築くことを究極の目標とする。

3. 研究の方法

溶液中の微粒子に不均一な電場を印加すると、溶液と微粒子の分極率の差より誘電泳動が誘起される。四重極電極における微粒子の移動速度 v_p は式(1) で表される[3]。

$$v_p = \beta \frac{2r_e^2 \epsilon_m U_{rms}^2 \text{Re}[Ke]}{3\eta d^4} \quad (1)$$

$$Ke = \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (2)$$

Ke は Clausius-Mossotti 因子で分極の程度を表す。 r_e は粒子の半径、 β は定数、 U_{rms} は印加電圧の実効値、 d は電極内の可動域の半径、 η は溶媒の粘度、添字の p と m はそれぞれ粒子と溶媒を表し、 ϵ は複素誘電率、 ϵ は誘電率である。

誘電率が異なる二種類の物質からなる微粒子でも、図2のように同じ半径で単一の微粒子とみなすことができる。これを用いることにより n 層構造の微粒子を $(n-1)$ 層構造の微粒子に変換することができ、繰り返すことで単一の微粒子とみなすことにより Clausius-Mossotti 因子を求めることができる[4]。

ところで、溶液中の微粒子には電気二重層が形成されるため、誘電泳動による微粒子操作の高精度化のためには、電気二重層を含む

微粒子モデルを考える必要がある。そこで、この電気二重層を含めて単一微粒子に等価変換し、Clausius-Mossotti 因子を求めることができる。文献[5][6]の理論に基づき、電気二重層の膜厚 d_{edl} は次式となる。

$$d_{edl} \propto \frac{1}{\sqrt{1 + \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}} \quad (3)$$

ω は角周波数, τ は電気二重層中のイオン濃度と拡散係数で決まる緩和時間である。

4. 研究成果

(1) 微粒子モデルの高精度化

実験ではポリスチレン粒子、ポリピロール被膜したポリスチレン粒子それぞれ粒径 5.2 μm のものを使用した。溶媒は導電率が 0.01 S/m の NaHCO_3 水溶液を用いた。ガラス基板に銅の四重極電極を作製し、そこに 4 V のパルス電圧を印加し、誘電泳動を観察した。パルス電圧印加前後の光学顕微鏡の画像を取得し、そこから微粒子の移動速度を測定した。

微粒子の移動速度の周波数依存性は、微粒子のみの Clausius-Mossotti 因子の周波数による変化だけでは説明できない。そこで、電気二重層を含む微粒子モデルを採用した。微粒子の誘電泳動力はクラウジウス・モソッチ因子と微粒子モデルの半径 r_{dep} の 3 乗の積に比例するため[3]、この計算結果と測定結果をフィッティングと規格化をして比較した。図 3, 図 4 より測定結果と計算結果がほぼ一致することがわかる。

(2) 自己整合微粒子操作支援回路の改良

図 1 に示したオンチップ微粒子操作の先行研究[2]では、動作時の発熱などによる溶液の温度上昇が問題となっていた。そこで、非接触給電と誘電泳動駆動信号の周波数を分離できるように、図 5 の回路構成のもの

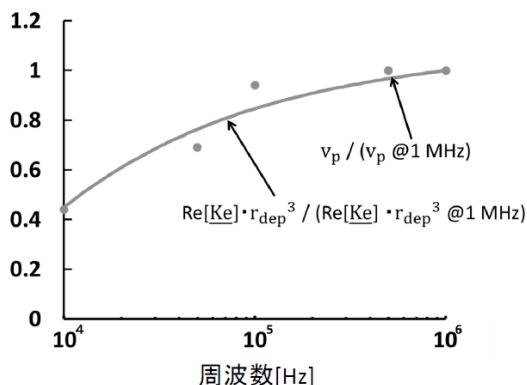


図 3 ポリスチレン粒子の測定結果と計算結果

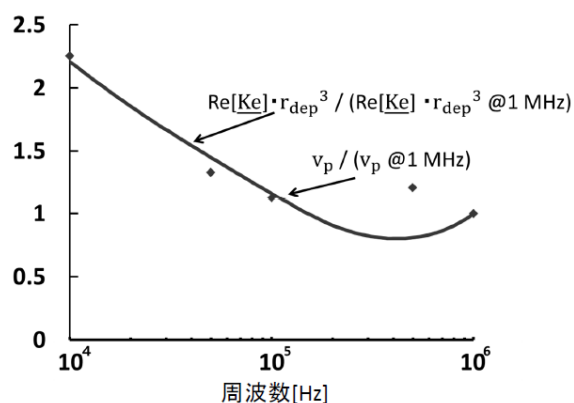


図 4 ポリピロールを被覆したポリスチレン粒子の測定結果と計算結果

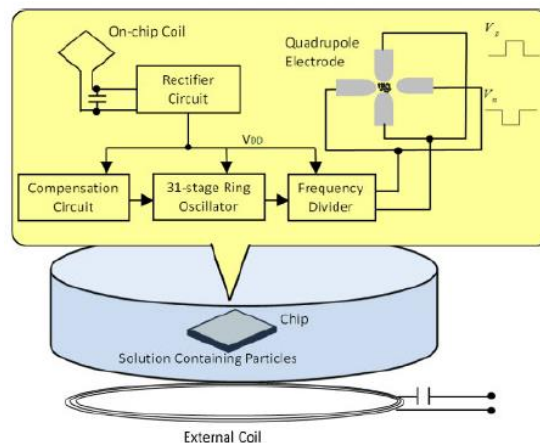


図 5 自己整合微粒子操作支援回路の改良版

開発した。オンチップ発振回路を搭載することで、適切な誘電泳動駆動低周波信号を生成できると同時に、AC 給電周波数を高くすることで、非接触給電の効率を向上させることに成功した。

<引用文献>

- ① Y. Ghallab and W. Badawy, "Sensing Methods for Dielectrophoresis Phenomenon: From Bulky Instruments to Lab-on-a-Chip," IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 4, No. 3, pp. 5-15, 2004
- ② S. Ueda, Y. Miyawaki, J. Wang, T. Matsuoka, and K. Taniguchi, "Wireless on-chip microparticle manipulation using pulse-driven dielectrophoresis," IEICE Electronics Express, Vol. 9, No. 1, pp. 16-22, Jan. 2012
- ③ S. Tsukahara, T. Sakamoto, and H. Watarai, "Positive Dielectrophoretic Mobilities of Single Microparticles Enhanced by the Dynamic Diffusion Cloud of Ions," Langmuir, Vol. 16, no. 8, pp. 3866-3872, Apr. 2000
- ④ T. B. Jones, "Electromechanics of Particles", Cambridge University Press, 2010

- ⑤ R. P. Buck, "Diffuse Layer Charge Relaxation at the Ideally Polarized Electrode," J. Electroanalytical and Interfacial Electrochemistry, vol. 22, no. 2, pp. 219-240, 1969
- ⑥ H. P. van Leeuwen, "Double-Layer Relaxation and Resistance Effects in Coulostatics," J. Electroanal. Chem., vol. 138, pp. 55-64, 1982

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yoshiaki Dei, Yasushi Kishiwada, Rie Yamane, Taisuke Inoue, and Toshimasa Matsuoka, "Low-power wireless on-chip microparticle manipulation system," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 54, no. 4S, p. 04DE10, Apr. 2015
DOI:10.7567/JJAP.54.04DE10
- ② Yasushi Kishiwada, Hirosuke Iwasaki, Shun Ueda, Yoshiaki Dei, Yusuke Miyawaki, and Toshimasa Matsuoka, "Low-power wireless on-chip microparticle manipulation with process variation compensation," IEICE Electronics Express, vol. 10, no. 13, p. 20130407, July 2013
DOI: 10.1587/elex.10.20130407

[学会発表] (計 10 件)

- ① 出井良明, 岸和田泰, 山根梨江, 井上泰佑, 松岡俊匡, "液中オンチップ微粒子操作非接触電力伝送の高効率化", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23-26日, 徳島
- ② 岸和田泰, 岩崎紘介, 上田瞬, 出井良明, 宮脇祐介, 松岡俊匡, "特性ばらつき補償を用いた低電力非接触給電微粒子操作集積回路", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014年9月23-26日, 徳島
- ③ Yoshiaki Dei, Yasushi Kishiwada, Rie Yamane, Taisuke Inoue, and Toshimasa Matsuoka, "On-chip Microparticle Manipulation with Efficient Wireless Power Transfer," International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 9-11, 2014, Tsukuba, Japan, pp. 966-967
- ④ 山根梨江, 岩崎紘介, 出井良明, 崔冀, 松岡俊匡, "オンチップ微粒子操作のための容量変化検出回路の低電源電圧化", 電子情報通信学会集積回路研究会, 2014年7月3-4日, 出雲市
- ⑤ Rie Yamane, Hirosuke Iwasaki, Yoshiaki Dei, Ji Cui, and Toshimasa Matsuoka, "A Capacitance Detection Circuit for On-chip Microparticle Manipulation," IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, June 19-20,

2014, Kyoto, Japan, pp. 102-103

- ⑥ 崔冀, 岩崎紘介, 出井良明, 松岡俊匡, "無線給電微粒子操作チップのための超低電圧電源モニタリング回路", 電子情報通信学会集積回路研究会, 2014年1月28-29日, 京都
- ⑦ 岩崎紘介, 崔冀, 上田瞬, 岸和田泰, 宮脇裕介, 出井良明, 山根梨江, 松岡俊匡, 藤井秀司, "オンチップ微粒子操作のための誘電泳動特性の解析", 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2013年11月5-7日, 仙台
- ⑧ 岩崎紘介, 出井良明, 上田瞬, 宮脇裕介, 岸和田泰, 崔冀, 松岡俊匡, 藤井秀司, "低電圧動作液中オンチップ微粒子操作に関する研究", 応用物理学会関西支部第2回講演会, 2013年10月9日, 奈良
- ⑨ 崔冀, 岩崎紘介, 出井良明, 松岡俊匡, "無線給電微粒子操作チップのための超低電圧電源モニタリング回路", 電気学会電子回路研究会, 2013年10月3-4日, 奈良
- ⑩ 崔冀, 松岡俊匡, "プロセスばらつき補償を有する低電圧 DCO", 電子情報通信学会総合大会, 2013年3月19-22日, 岐阜

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.si.eei.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 俊匡 (MATSUOKA, Toshimasa)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80324820

(2) 研究分担者

藤井 秀司 (FUJII, Shuji)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：70434785

(3) 連携研究者

なし