

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560324

研究課題名 (和文) 自己整合微粒子操作基盤技術創出のための超低電圧集積回路の研究

研究課題名 (英文) Study on Ultra-Low-Voltage Integrated Circuits for Self-Aligned Particle-Manipulation Technology

研究代表者

松岡 俊匡 (MATSUOKA TOSHIMASA)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80324820

研究成果の概要 (和文)：

状況の多角的な判断や冗長性による誤動作回避などが期待できるスマート・センサの形態として複数のセンサを CMOS 集積回路上に融合したセンサ・オン・CMOS を考えると、従来のリソグラフィとエッチングを基盤とする加工技術だけでは、混載できるセンサの種類の数にコスト的に限界がある。そこで、誘電泳動に基づき溶液中で特定の微粒子を捕獲する微細四重極電極とこれを駆動する AC 非接触給電小型駆動回路を用いる「自己整合微粒子操作技術」に関する基礎的検討を実施し、その可能性を示した。

研究成果の概要 (英文)：

Sensor-On-CMOS with some sensors for comprehensive decision of situations and prevention of errors by redundancies has a limit in number of sensor types on the same chip in conventional production manners. Self-aligned particle-manipulation technique, which uses small-size quadruple electrodes for particle manipulation based on dielectrophoresis phenomenon and AC-wireless-powered small-size driver circuit for it, is studied, and its feasibility has been demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：集積回路, 低消費電力, 誘電泳動, 自己整合, センサ

1. 研究開始当初の背景

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は誘電泳動 (Dielectrophoresis) と呼ばれる。近年、この誘電泳動を用いて微粒子を電氣的に制御する試みがなされている (“Sensing Methods for Dielectrophoresis Phenomenon: From

Bulky Instruments to Lab-on-a-Chip,” Y. Ghallab and W. Badawy, IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 4, No. 3, pp. 5-15, 2004)。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ようになりつつある。このように、微粒子制御可能な“Lab-on-a-Chip”技術は、現在、評価・分析技術への応用が期待されている。

研究代表者は、過去に行ってきた集積回路技術とシリコン・デバイス製造技術に関する経験をベースにして、半導体集積回路とセンサ材料との融合によるインテリジェント・センサの創出を目指している。これにより、状況の多角的な判断や冗長性による誤動作回避などが期待できる。また、このような小型デバイスで複数たんぱく質の種類が同定できれば、ホルモンなどを用いた人体中での”分子通信” (“分子通信”, 檜山、森谷、須田, 信学会誌, Vol. 89, No. 2, pp. 162-166, 2006) も不可能ではない。

2. 研究の目的

上述のデバイス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だけでは、混載できるセンサの種類に限界がある。

そこで、研究代表者は上述の誘電泳動による微粒子制御技術、特に微細な四重極電極を用いて特定の微粒子を捕獲することが可能である (“In situ Measurement of Dielectrophoretic Mobility of Single Polystyrene Microparticle,” H. Watarai, T. Sakamoto, and S. Tsukahara, Vol. 13, No. 8, pp. 2417-2420, 1997) ことに着目する。微粒子にセンシング特性自体を与えたり、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、これを適用すれば、所望の位置に四重極電極を形成して所望のセンサ材料を形成することができる。この際、液体と粒子の種類に応じて誘電分散が異なるために、適切な周波数の電圧を四重極電極に印加する必要があり、複数のセンサ材料を扱う場合には工夫が必要である。

この工夫の1つとして、研究代表者はセンサをシリコン集積回路上に形成することを想定し、誘電泳動を支援する小型回路を搭載することを考案した。図1に示すように、この回路は、四重極電極に適切な周波数の信号を供給し、所望の位置に所望のセンサ材料が集まることを支援する「自己整合微粒子操作支援回路」である。この回路への給電は、スクライプ・ラインなどを利用したコイルを介した AC 電力を用いる。このようなセンサへの AC 非接触給電技術はインテリジェント・センサでは近年良く用いられるようになっており (“Photosensing Resolution of Wireless Communication Chip in Inhomogeneous RF-Magnetic Field,” T. Hasebe, Y. Yazawa, T. Tase, M. Kamahori, K. Watanabe, and T. Oonishi, Jpn. J. Appl.

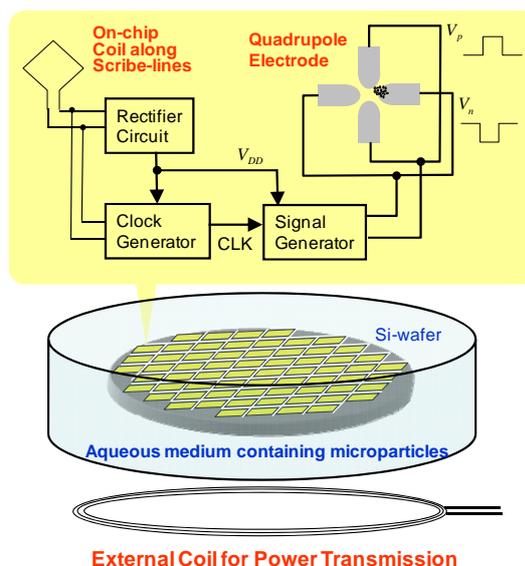


図1 自己整合微粒子操作支援回路を併用した誘電泳動を用いたセンサ部形成の概念図

Phys., Vol. 45, No. 4B, pp. 3794-3798, 2006.)、研究代表者の行ってきた集積回路技術を用いることで原理的には実現可能である。しかし、この AC 非接触給電で問題のないように「自己整合微粒子操作支援回路」を実現するには、低電圧動作で低電力な回路技術が必要不可欠である。さらに、「自己整合微粒子操作支援回路」の占有面積も、本来必要な回路に比べて小面積となるようにする必要もある。

ここで提案する技術は、従来評価・分析に用いられていた誘電泳動を製造プロセスに応用しているだけでなく、集積回路技術も加えることにより世界でも例のないユニークな研究となっている。また、従来のリソグラフィ、エッチングによるトップ・ダウン的な加工と表面の物理や化学に基づく自己整合的なボトム・アップ的な製膜技術の中間的なものであり、将来の微細加工技術のブレークスルーの1つと成り得る可能性も秘めている。

3. 研究の方法

センサ材料を半導体集積回路の上に混載したセンサ・オン・CMOS の創出のため、四重極電極における微粒子の誘電泳動を半導体集積回路で制御する「自己整合微粒子操作支援回路」の実現を目指した検討を行った。具体的には、1) 誘電泳動駆動回路の CMOS デジタル回路による実現可能性を確かめるため、ガラス基板と微粒子を用いたパルス駆動誘電泳動の基礎実験を実施し、その有用性を確認、2) 0.18 μm CMOS プロセスを用いた回路シミュレーションと電磁界シミュレーションを併用した、「自己整合微粒子操作支援回路」の実現可能性の検討、である。

4. 研究成果

(1) パルス駆動誘電泳動による微粒子操作

溶液中の微粒子に外部から不均一電界を印加すると、溶液と微粒子の誘電率の違いから誘電泳動が起こる。微粒子(溶液)の分極率が溶液(微粒子)よりも大きい場合、電界強度の強い(弱い)方向へ微粒子が移動する、正(負)の誘電泳動を示す。誘電泳動力の時間平均は次式で与えられる。

$$\langle F_{DEP} \rangle = \beta \frac{4\pi r_e^3 \epsilon_m R V_{rms}^2 \text{Re}[K_e]}{d^4}$$

ここで、 K_e はクラウジウス・モソッチ因子、 r_e は微粒子半径、 β は定数、 V_{rms} は印加電圧の実効値、 d は電極内の可動域の半径、 ϵ_m は溶液の誘電率、 R は電極間の中心と微粒子との距離を示す。

従来方法は正弦波を印加するが、提案方式ではパルス波を印加する。四重極電極を用いたパルス駆動誘電泳動においても、図2に示



図2 四重極電極におけるパルス駆動誘電泳動

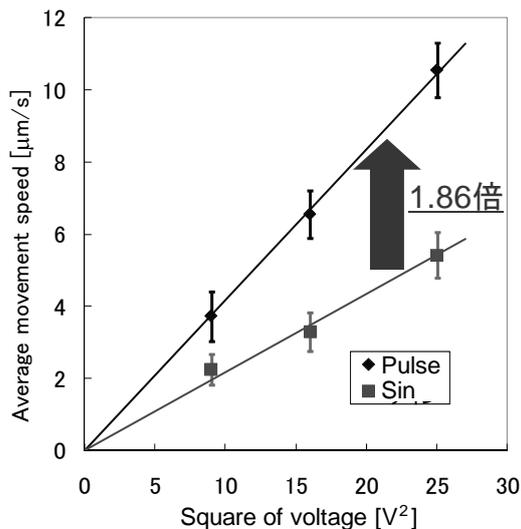


図3 ガラス基板上の NaHCO_3 溶液(導電率: 60 mS/m) 中の SiO_2 粒子(半径: 5 μm) の誘電泳動の移動速度の測定結果

すように、中心部に微粒子が集まる。パルス波のフーリエ級数展開より、パルス波の基本波振幅の二乗は同一振幅の正弦波のそれに比べて約 1.87 倍となり、提案方法では微粒子の移動速度も大きくなることを期待できる。

ガラス基板上の NaHCO_3 溶液(導電率: 60 mS/m) 中の SiO_2 粒子(半径: 5 μm) の誘電泳動の測定結果を図3に示す。これより、パルス波では正弦波の約 1.86 倍の平均移動速度が得られることが実証された。

このような結果に基づき電極や駆動回路を集積化するが、パルス駆動誘電泳動が有効であるということは、駆動回路が小型化に有利なデジタル回路で構成できることを意味する。

(2) AC 非接触給電小型駆動回路

図1に示すような自己整合微粒子操作支援回路を併用した誘電泳動によるセンサ・オン・CMOSのセンサ部形成において、スクライブ・ラインを利用したコイルを介した AC 非接触給電で得た電力により、四重極電極に適切な周波数のパルス信号が供給され、この電極に対して整合した位置に微粒子状のセンサ材料が集まることになる。

AC 非接触給電信号から CMOS 整流回路 (“High-Efficiency Differential-Drive CMOS Rectifier for UHF RFIDs”, K. Kotani and T. Ito, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 44, No. 11, pp. 3011-3018, Nov. 2009) により DC 電源電圧が、シュミット・トリガ (“Low voltage CMOS Schmitt trigger circuits”, C. Zhang, A. Strivastava and P. K. Ajmera, Electronics Letters, Vol. 39, No. 24, pp. 1696-1698, Nov. 2003) を用いてクロックが生成される。このクロックをデジタル回路で分周することで、所望の周波数のパルス信号を得ることができる。

0.18 μm CMOS プロセスでこれら回路を設計し、全体でのシミュレーションで、0.7V の内部電源電圧と 50MHz のクロック、及びこれらを使って 3MHz 程度の周波数の誘電泳動駆動用パルス信号が得られることを確認している。

(3) 低電圧デジタル CMOS 回路の特性補償

溶液の粘性の温度依存性を通して、誘電泳動は温度に依存する。このため、非接触給電での電力損失や「自己整合微粒子操作支援回路」の電力消費に伴う発熱を極力避けたい。そこで、「自己整合微粒子操作支援回路」自体の消費電力を低減し、そこに供給するべき電力も低減することが必要である。

このような低電力化は動作電源電圧の低減により解決できるが、0.5V 以下という低電源電圧となると、一部のロジック回路では弱

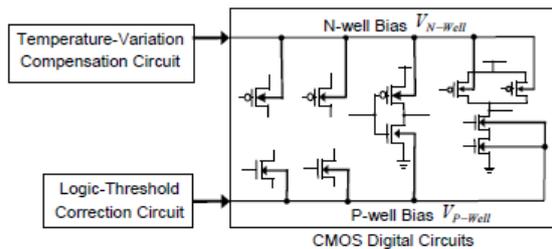


図4 弱反転動作 CMOS ロジック回路の特性変動抑制技術の構成図

反転動作が必要となってくる。この弱反転状態は従来の強反転動作よりも温度や素子特性ばらつきに対する強い依存性をもつため、その補償方法が重要である。そこで、図4に示すように、トランジスタのボディ電圧を温度や素子特性ばらつきに応じて制御することにより、ロジック回路の特性を補償する手法を提案した。提案手法により、動作周波数の温度依存性が大きく改善することを回路シミュレーションにより実証した。さらに、10進カウンタのチップ試作も0.18 μm CMOSプロセスを用いて行い、試作チップの実測により0.3Vという超低電源電圧まで提案手法が有効であることが確認できた。

また、アナログ信号を扱う上で重要なオペアンプについても0.5V対応が可能なインバータ・ベースの回路構成を検討し、回路シミュレーションにより良好な特性を確認している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1) J. Wang, K. Yasue, T. Matsuoka, and K. Taniguchi, "A Design for Ultra-Low-Voltage CMOS Digital Circuits with Performance Characteristics Compensation," *Far East J. Electronics and Communications*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-65, Sep. 2010 (査読有).

2) T. Matsuoka, J. Wang, T. Kihara, H. Ham, and K. Taniguchi, "Low-Voltage Wireless Analog CMOS Circuits toward 0.5 V Operation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E93-A, No. 2, pp. 356-366, Feb. 2010 (招待論文).

3) 安江一紘, 王軍, 松岡俊匡, 谷口研二, "超低電圧動作デジタル CMOS 回路の特性補償に関する検討", *電子情報通信学会論文誌 C*, Vol. J93-C, No. 2, pp. 75-77, Feb. 2010 (査読有).

4) J. Wang, T.-Y. Lee, D.-G. Kim, T. Matsuoka, and K. Taniguchi, "Design of A 0.5V Op-Amp Based on CMOS Inverter Using Floating Voltage Sources," *IEICE Trans. Electron*, Vol. E91-C, No. 8, pp. 1375-1378, Aug. 2008 (査読有).

[学会発表] (計4件)

1) 宮脇祐介, 上田瞬, 松岡俊匡, 谷口研二, "水中センサ用無線給電回路の検討", 電子情報通信学会 関西支部 第15回 学生会研究発表講演会, 2010年3月10日, 大阪大学

2) 上田瞬, 宮脇祐介, 松岡俊匡, 谷口研二, "パルス駆動誘電泳動を用いた微粒子操作技術", 電子情報通信学会 関西支部 第15回 学生会研究発表講演会, 2010年3月10日, 大阪大学

3) 安江一紘, 王軍, 松岡俊匡, 谷口研二, "超低電圧動作デジタル CMOS 回路の特性補償に関する検討", *LSI とシステムのワークショップ 2009*, 2009年5月18-20日, 北九州市

4) K. Yasue, J. Wang, T. Matsuoka, and K. Taniguchi, "Study of Subthreshold-Operation CMOS Logic Circuit with Body-Bias-Control," *IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai*, May. 22-23, 2008, Osaka, Japan, pp. 95-96.

[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・工学研究科・准教授

研究者番号: 80324820