

CMOS 集積回路と MEMS の融合

A Fusion of CMOS Integrated Circuit with MEMS

石原 昇 天川修平 益 一哉



インダクタ・キャパシタ，アクチュエータ，センサとして MEMS デバイス技術に注目した．機械的構造を半導体製造技術で実現することにより，小形で高周波特性に優れたパッシブの変素子や加速度，圧力などの力のセンシング，制御が可能になる．多様性に富んだ超小形の次世代システムの実現には，親和性のある MEMS 技術と CMOS 集積回路技術の融合が有望と考えられる．そのためには，更なる技術開発はもちろん，異種機能デバイスを統合設計するための設計環境の構築が今後重要度を増すであろう．

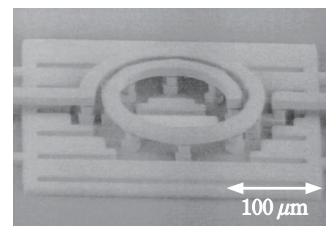
キーワード：MEMS，パッシブ，アクチュエータ，センサ，CMOS

1. はじめに

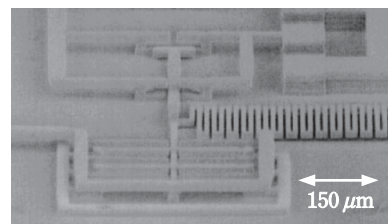
システムの五感を担う入出力回路は，高性能のフィルタやセンサなどの受動素子を用いたアナログ回路で構成されているため LSI 技術の微細化に十分な追従ができず，システムのサイズ，機能，性能やコストを律速する要因としてクローズアップされている．例えば，現在の携帯無線端末では，音声通信だけでなく無線 LAN，赤外線通信，ワンセグ TV 受信，GPS ナビゲーション，デジタルカメラ，お財布機能，タッチセンサ制御，ミュージックプレーヤなど様々な機能が集積化されており，それらの入出力回路部には，多くのアンテナ，RF 用フィルタ，電源用 LC フィルタなどの受動素子，そして，音声，赤外線，加速度，温度やキーボードタッチを検出するセンサ，更にスピーカ，振動モータ，赤外線 LED や表示 LED など多くの制御素子が搭載されている．それらの携帯端末に占める容積比率，コスト比率は年々高まっている．このため，これらの受動素子の一層の小形化，複合化，LSI 技術との融合化を可能とし，システムの更なる小形化，多様化，経済化をけん引する技術として，個別部品の更なる小形化技術はもちろん，基

板への埋込技術⁽¹⁾や三次元実装技術⁽²⁾，MEMS (Micro ElectroMechanical System) 技術への期待が大きい．

本稿では，MEMS 技術にスポットを当て高周波無線通信回路における LC フィルタなどの受動素子，それらの値をチューニング制御するためのアクチュエータ及び加速度，圧力，マイクなどのセンサとしての特徴について紹介し，CMOS 集積回路技術との融合に向けた課題，展望を概観する．



(a) スパイラルインダクタ



(b) スプリング形アクチュエータ

図1 MEMS デバイスの例 半導体プロセス技術をベースとした製造技術で小形，中空の機械構造デバイスを実現．

石原 昇 益 一哉 正員 東京工業大学統合研究院ソリューション研究機構
 天川修平 正員 広島大学大学院先端物質科学研究科半導体集積科学専攻
 Noboru ISHIIHARA, Kazuya MASU, Members (Solutions Research Laboratory,
 Tokyo Institute of Technology, Yokohama-shi, 226-8503 Japan), and Shuhei
 AMAKAWA, Member (Graduate School of Advanced Sciences of Matter,
 Hiroshima University, Higashihiroshima-shi, 739-8530 Japan).
 電子情報通信学会誌 Vol.93 No.11 pp.928-932 2010年11月
 ©電子情報通信学会 2010

2. MEMS デバイス技術の基本的特徴

図1にスパイラルインダクタとアクチュエータのデバイス写真例を示す。MEMS デバイスは機械的機構を半導体製造技術により実現するもので、超小形の機械構造を生かしたパッシブ素子やセンサ、アクチュエータを実現できる。また、半導体製造技術を用いているため CMOS 集積回路との親和性が根本的にあり、その融合化が期待される。図2は MEMS on CMOS のイメージである。CMOS 集積回路を構成した後に MEMS デバイスを上層に集積できる。もちろん、CMOS 集積回路チップと MEMS デバイス回路の占有面積の大小関係によって CMOS on MEMS やマルチチップ実装構成の解もある。

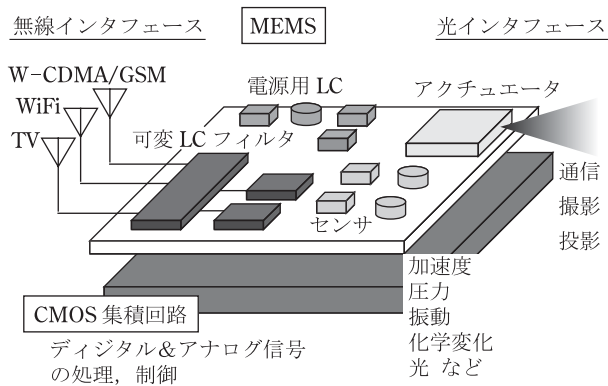


図2 MEMS on CMOS CMOS 集積回路の上にポストプロセスで MEMS デバイス回路を構成。

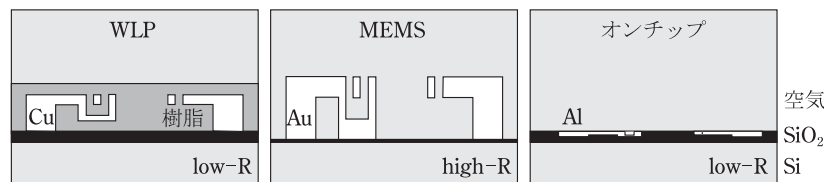
3. 高周波用インダクタとキャパシタ

MEMS によるインダクタやキャパシタンスの特長は、誘電体のない中空構造であることと、可動機構によりそれらの値を制御できる点にある。図1(a)は MEMS 技術によるスパイラルインダクタの例であるが、誘電体が存在しないため寄生容量が小さく損失の小さいインダクタを実現できる。

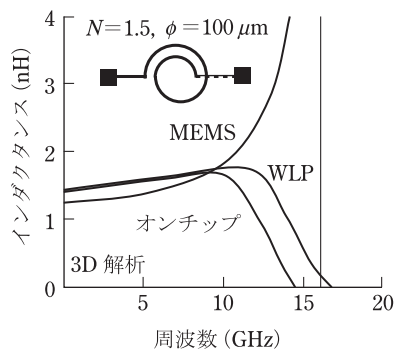
3種類のインダクタの特性比較を三次元電磁界解析により行った結果を図3に示す。パッケージ (WLP: Wafer Level Package) の配線を利用した構成、中空構造の MEMS 構成、CMOS 集積回路上の最上層配線を利用した構成で、インダクタの直径 $100\mu\text{m}$ 、巻き数 1.5 を条件とした。MEMS インダクタは中空構造であるので線間容量が最も小さく、高い自己共振周波数を得ることができる。また、MEMS インダクタでは図3(c)の解析結果から分かるように、ほかに比べ Q 値の高い周波数領域が広いことが分かる。パッケージ配線によるインダクタでは樹脂の容量の影響により Q 値の高い領域が狭まっており、オンチップインダクタでは酸化膜容量と低抵抗シリコン基板と配線の距離が短いため基板での損失が生じ Q の最大値も低くなっている⁽³⁾。

MEMS 容量に関しては、誘電体がないため大容量の実現は難しいが高耐圧となることから高周波の大信号フィルタへの応用に適している。

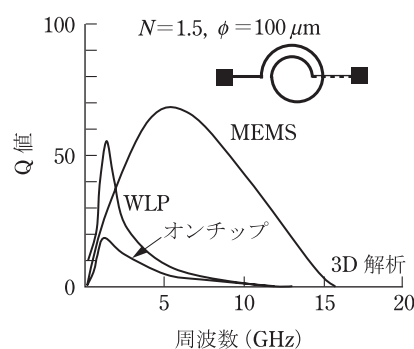
特に無線通信回路のアンテナインタフェース部のフィルタ回路や発振回路部では、高い電力効率や低い雑音特性を得るため低損失、高 Q のフィルタが必要となって



(a) 比較したインダクタの断面構造



(b) インダクタンス値



(c) Q 値

図3 構造によるスパイラルインダクタンスの特性 中空構造により MEMS インダクタが高周波特性に最も優れる。

いる。現在、個別部品が主に使用されており 0402 部品も開発され小形化も着実に進められているが、LSI の小形化、多様化のニーズに十分対応できている状況とはいえない。0.8~6 GHz の広い周波数範囲に存在する無線信号を選択制御するにはバンド数に応じたアンテナとの切換スイッチやフィルタが複数必要となっている。

MEMS デバイスは広帯域特性に優れた特性を可変できることから、RF 回路用の可変パッシブコンポーネントとして期待が大きい⁽⁴⁾。

このほか、基準周波数発振回路や高周波フィルタに適

用可能な、放射モードの円形共振子を用いた高 Q の MEMS デバイスも提案され注目を集めている⁽⁵⁾。クリスタル共振子の不要化が期待される。

4. アクチュエータ

MEMS では構造体を可動させることにより前述のインダクタやキャパシタンスの値を制御することができる。機械制御の方法としては、電界、磁界（電流）、圧電素子や熱により発生する力を利用する。表 1 に示すよ

表 1 様々な MEMS アクチュエータの形状 電界、磁界(電流)、圧電や熱により発生する力を利用。

制御法	垂直変位	水平変位
電界	<p>(a) カンチレバー構成</p>	<p>(b) 水平スプリング構成</p>
	<p>(c) 垂直スプリング構成</p>	<p>(d) くし形構成</p>
	<p>(e) カンチレバー構成 (PZT)</p>	<p>(f) カンチレバー構成 (磁石)</p>
	<p>(g) 膨張係数差構成</p>	<p>(h) 熱膨張構成</p>
熱	<p>(g) 膨張係数差構成</p>	<p>(h) 熱膨張構成</p>
	<p>マイクロミラー マイクロミラーの角度を機械的に制御</p> <p>CMOS 集積回路</p> <p>(i) デジタルマイクロミラーデバイス</p>	

うな様々な構造、制御機構によるアクチュエータが提案されている^{(6)~(9)}。

電界制御型は電極間に電圧を加え静電気力により電極を引き付ける。(a)は、カンチレバー構造による単純なDCコンタクトスイッチで、電極間の電界強度を制御することにより配線接続のオンオフを行うことができる。(c)は中央のコンタクト部分を四方のスプリングでつった構造となっており、上部と下部の電極間に電界をかけることによりスイッチ動作を実現できる。水平方向の変位を得る構成としては、スプリング形(b)やくし形(d)が提案されている。これらの可動機構はスイッチ制御だけでなくアナログ的な制御にももちろん応用できる。

図4は、スプリング形構造について印加する電圧と変位量の関係を算出した結果例である。制御電圧は数 μm 以上の変位を得ようとした場合、一般的に数十V以上の高電圧が必要となる。電界制御型では電流は消費しないが高電圧が必要となる。

比較的低電圧で制御できる構成としては、ピエゾ素子を用いた構成が提案されている(表1(e))。ピエゾ素子は電圧を印加すると形状がゆがむ、この力をアクチュエータに応用している。~5V程度の比較的低い電圧での制御が可能とのことである。

磁界制御型(f)は、MEMS構造の中に磁石を設け、配線に電流を流し磁界を発生させ、磁石との反発力、引力を利用するものである。アンペアオーダの大電流が必要となる場合もあり電力消費が懸念される。

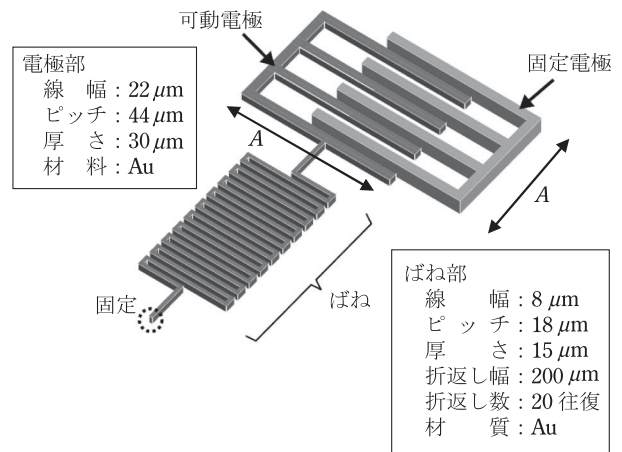
熱による制御は素材を加熱し、その熱膨張を利用するもので、素材自身の熱膨張(h)や2種類の材料の熱膨張差を利用した構成などが提案されている。

また、光信号の制御応用として投射形ディスプレイ用のデジタルマイクロミラーデバイス(DMD: Digital Micromirror Devise)が実用化されており注目を集めている⁽¹⁰⁾。数多くのマイクロミラー(数十 μm 角ほど)を制御し光信号の光路を可変する。

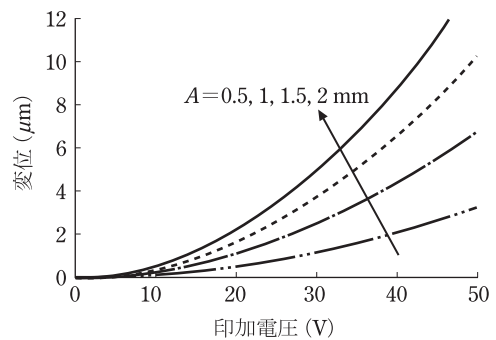
なお、MEMSのスイッチや可変フィルタは、機械制御であることから振動や経時変化の影響を受けやすい。このためアクチュエータの制御には電子回路によるフィードバック制御は不可欠となる。DMDではCMOS制御回路基板上に構成されている(表1(i))。

5. MEMSのセンサ応用

温度や光などのセンシング機能は、既に集積回路に組み込まれ、医療バイオ応用を目指したpHセンサやDNAセンサなどもCMOS集積回路に組み込まれつつある。MEMSは、その機械的構造から人や車、ロボットなどの動きをセンスするデバイスとして注目を集めている。昨今では、ゲーム機に加速度センサが搭載され話題を呼んだ。加速度センサは、大形の機械式のものや光



(a) スプリング形 MEMS アクチュエータ



(b) 変位と制御電圧の関係

図4 スプリング形 MEMS アクチュエータの変位と制御電圧の関係(計算結果) 制御には高い電圧印加が必要。

ファイバを用いた光学式のものがあったが、安価で超小形の MEMS 加速度センサの出現によりアプリケーション領域が大きく広がった。

加速度センサは、例えば表1の(d)のような構成で、可動部の位置が加速度により変位し、その変位を容量の変化としてとらえる。これを増幅し加速度信号として検出する⁽¹¹⁾。容量変化は aF (10^{-18}F) オーダと小さいが回路技術との組合せにより高感度化が実現され、3軸の加速度センサも既に製品化されている。

このほか、ピエゾ素子との組合せによる圧力センサや音声マイク⁽¹²⁾なども製品化されており、機械的变化を電気信号に変換するための超小形センサとしての MEMS デバイスの知名度が高まっている。

6. CMOS 集積回路と MEMS デバイスの融合

多様性に富んだ超小形の次世代システムを実現するには、更なる製造技術、パッケージングの向上はもちろん、CMOS集積回路とMEMSデバイスを融合するための設計プラットフォームの構築が重要と考える。以下に回路設計の観点から見た課題を示す。

(1) MEMS プロセスの標準化

集積回路の製造技術とコンパチビリティの取れる MEMS 製造技術の標準化が必要と考えられる。製造技術に関する詳しい知識がなくても制約条件を理解することによりデバイス/回路の設計開発が集積回路設計と同様のレベルで設計開発に取り組みやすくなる。

(2) モデルライブラリの拡充

MEMS デバイスのレイアウトパターンデータを整備、蓄積し、機械特性及び電気特性のシミュレーションモデルも構築、蓄積し、MEMS デザインキットとして CMOS 集積回路の設計ライブラリと一緒に統合管理、活用する。MEMS 回路と CMOS 集積回路の電気機械の融合設計が容易になる。

(3) CMOS 制御回路の開発

電界制御型の MEMS 回路では、数十 V 以上の高い電圧を必要とする。微細 CMOS トランジスタの耐圧は、2~3 V と低いことから低耐圧トランジスタによる昇圧回路など微細 CMOS 回路技術による MEMS 制御回路の研究開発が必要である。

(4) 統合設計環境の構築

異種機能デバイスの統合設計を可能とする設計環境(設計プラットフォーム)の構築が重要である。デバイスレベルからモジュールレベルまでを対象とした機械構造解析、熱解析、電子回路解析、電磁界解析、実装回路解析による動作の検証が必要となる。構造やレイアウトパターンデータ、特性解析モデルを一元管理し、必要に応じてモデルの分解能を変換し異種ソルバ間で共用できるデータベースの構築が重要と考えられる。構造寸法データやパターンデータは、機械解析や熱解析、三次元電磁界解析などで共用できる。

運動方程式、熱方程式、電気回路方程式などは、相溶性⁽¹³⁾を有することから、統合解析を可能とするソルバやデータインタフェース技術の開発も期待される。

7. ま と め

多様性に富んだ超小形の次世代システムの実現には MEMS 技術によるインダクタ・キャパシタ、アクチュエータ、センサと CMOS 集積回路技術の融合が有望と考えられる。

文 献

- (1) 藤巻 升, 小池 清, 高見和裕, 尾形繁行, 飯長 裕, "e 機能モジュールを支える部品内蔵基板技術の開発," OKI テクニカ

ルレビュー, 第 216 号, vol. 77, no. 1, pp. 18-22, 2010.

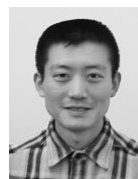
- (2) ASET, ドリームチップ平成 21 年度研究成果報告会資料, 2010.
(3) 水落 裕, 天川修平, 石原 昇, 益 一哉, "RF CMOS 回路の高性能化に向けたオンチップ/オフチップインダクタ特性の比較," 2009 信学総大, no. C-12-29, p. 117, March 2009.
(4) 桑原 啓, "集積化 MEMS 技術の無線通信デバイスへの応用," 第 46 回応用物理学会スクール「集積化 MEMS 技術 基礎から応用」, pp. 75-84, 2010.
(5) C.T.-C. Nguyen, "Integrated micromechanical RF circuits for software-defined cognitive radio," 第 26 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム論文集, no. PL-1, pp. 1-5, 2009.
(6) S.P. Pacheco, L.P.B. Katehi, and C.T.-C. Nguyen, "Design of low actuation voltage RF MEMS switch," IEEE MTT-S IMS Digest, no. TU3B-4, pp. 165-168, 2000.
(7) W. Tang, M. Lim, and R. Howe, "Electrostatic comb drive levitation and control method," J. Microelectromech. Syst., vol. 1, no. 4, pp. 170-178, Dec. 1992.
(8) 鈴木孝明, 田澤慶郎, 神野伊策, 小野寺秀俊, "RF-MEMS スイッチ用圧電薄膜型マイクロアクチュエータの開発," 日本 AEM 学会誌, vol. 16, no. 2, pp. 82-87, 2008.
(9) Y. Wang, Z. Li, D.T. McCormick, and N.C. Tien, "Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications," 15th IEEE International Conference on MEMS, pp. 645-648, 2002.
(10) 新地 修, 林田正尚, "デジタル・マイクロミラー・デバイス (DMD)," 1996 信学総大, no. TC-4-5, pp. 375-377, March 1996.
(11) T.D. Tan, S. Roy, N.P. Thuy, and H.T. Huynh, "Streamlining the design of MEMS devices: An acceleration sensor," IEEE Circuits and Syst. Mag., vol. 8, no. 1, pp. 18-27, 2008.
(12) R.P. Ried, E.S. Kim, D.M. Hong, and R.S. Muller, "Piezoelectric microphone with on-chip CMOS circuits," J. Microelectromech. Syst., vol. 2, no. 3, pp. 111-120, 1993.
(13) 年吉 洋, "MEMS の統合設計技術," 第 46 回応用物理学会スクール「集積化 MEMS 技術 基礎から応用」, pp. 31-42, 2010.

(平成 22 年 6 月 12 日受付 平成 22 年 6 月 22 日最終受付)



いしはら のぼる
石原 昇 (正員)

1981 群馬大・工・電子卒, 工博(東工大, 1997). 1981 日本電信電話公社(現 NTT) 電気通信研究所入所。以来, 高速・高周波通信用アナログ集積回路/モジュールの研究開発に従事。2004 群馬大大学院工学研究科客員教授, 2008 東工大統合研究院特任教授, 現在に至る。IEEE 会員。



あまかわ しゅうへい
天川 修平 (正員)

1995 東大・工・電子卒, 2001 同大学院博士課程了, 工博。その後ケンブリッジ大, 英国と日本での企業勤務, 東工大を経て, 2010 広島大大学院先端物質科学研究科准教授, 現在に至る。オンチップ高速信号伝送技術, Si RF CMOS 回路技術, デバイス評価・モデリング技術の研究に従事。IEEE 会員。



ます かずや
益 一哉 (正員)

1975 神戸高専・電気卒, 1977 東工大・工・電子物理卒, 1982 同大学院博士課程了, 工博。同年東北大電気通信研究所助手, 1993 同助教。2001 東工大精密工学研究所教授, 2005 同大学統合研究院教授, 現在に至る。オンチップ高速信号伝送技術, Si RF CMOS 回路技術, 異種機能集積設計技術の研究に従事。IEEE, 応用物理学会, 電気学会, エレクトロニクス実装学会各会員。