Development of Electrostatic Actuator for Ohmic-Contact RF MEMS Switch/Relay

Tomonori Seki Member (Ritsumeikan University and Omron Corp. tomonori_seki@omron.co.jp)

Takahiro Masuda Non-member (Omron Corp. takahiro_masuda2@omron.co.jp)

Yutaka Uno Non-member (Omron Corp. yutaka_uno@omron.co.jp)

Fumihiko Sato Member (Omron Corp. fumihiko_sato@omron.co.jp)

Koichi Imanaka Member (Ritsumeikan University and Omron Corp. koichi_imanaka2@omron.co.jp)

Susumu Sugiyama Member (Ritsumeikan University sugiyama@se.ritsumei.ac.jp)

Keywords : Micromachining, RF MEMS, Switch, Relay, Non-linear spring

This paper reports a compact switch/relay with excellent high frequency performance at around 2GHz is developed by adopting a novel non-linear spring structure and high frequency signal line structure. The non-linear spring system applied to an electrostatic actuator of RF MEMS switch/relay increases restoration force for switching reliability. When our static actuator with a movable electrode area of 1.4-mm² was driven at a voltage of 24V, it was proved analytically to have a restoration force three times as large as that of conventional linear spring systems, and was shown to have achieved the stable signal on-off control action.

The maximum restoration force can be about three times higher than that of a linear spring system actuator. Fig.1 shows the schematic of RF-MEMS switch/relay structure.

Fig. 1. Exploded view of the RF-MEMS switch/relay

It is comprised of a glass substrate and a silicon substrate. On the glass substrate two signal lines, bonded contacts on an edge of each wire, a fixed electrode for driving, its passivation layer and a bonding pad are mounted. The silicon substrate is bonded to the glass substrate with two anchors and comprises a movable electrode, a release spring and a movable contact formed through an insulator. In the area surrounding the bottom of the movable electrode, protrusions are formed for the optimum non-linear spring system. Fig.2 shows the measurement results of restoring force.

(A): Open state. (B): Position when projections contacted substrate.
(C): Closed state. (Movable contact and fixed contacts are touched.)

Fig. 2. Measurement results of restoring force

Fig. 3. Electrical life test measurement results (Over 100 million cycles)

Upon application of voltage between the fixed electrode on the glass substrate and the movable electrode on the silicon substrate, an electrostatic force is generated. As a result the movable electrode is attracted to the glass substrate and the protrusions make contact with the passivation layer that covers the fixed electrode.

No failure due to restoration force shortage is observed during the switching tests with electrical resistive load up to 100 million cycles. Fig.3 shows the measurement results of electrical life test.

有接点 RF MEMS スイッチ/リレー用静電駆動アクチュエータの開発

正員 積 知範^{*,**} 非会員 増田 貴弘^{**}
 非会員 宇野 裕^{**} 正員 佐藤 文彦^{**}
 正員 今仲 行一^{*,**} 正員 杉山 進^{*}

Development of Electrostatic Actuator for Ohmic-Contact RF MEMS Switch/Relay

Tomonori Seki^{*,**}, Member, Takahiro Masuda^{**}, Non-Member, Yutaka Uno^{**}, Non-member,
 Fumihiko Sato^{**}, Member, Koichi Imanaka^{*,**}, Member, Susumu Sugiyama^{*}, Member

A compact switch/relay with excellent high frequency performance at around 2GHz is developed by adopting a novel non-linear spring structure and high frequency signal line structure.

The non-linear spring system applied to an electrostatic actuator of RF MEMS switch/relay increases restoration force for switching reliability. The maximum restoration force can be three times higher than that of a linear spring system actuator. No failure due to restoration force shortage is observed during switching test up to 100 million cycles. The present RF MEMS switch/relay has been shown competitive RF performance over conventional RF switches such as PIN diodes and GaAs MMIC both by the experimental results.

キーワード：マイクロマシニング，RF MEMS，スイッチ，リレー，非線形ばね

Keywords : Micromachining, RF MEMS, Switch, Relay, Non-linear spring

1. はじめに

高度情報化社会が進むにつれ伝達する情報が大量化し、機器間／機器内での情報（信号）伝達速度の増加は著しい。信号の周波数を上げれば、周波数に比例し信号に盛り込める情報が増える＝伝達速度が増す。このことより、現在では携帯電話をはじめとし IT (Information Technology) 機器には多くの GHz 帯周波数信号が使われている。また、携帯電話、デジタルカメラなどに代表されるモバイル化／機器の小型化も依然市場のニーズとしては大きく、加えて機能の集積化が商品価値を高めるコンセプトとなり、複数の機能を切り替える小型で GHz 帯の高周波数信号のスイッチング特性に優れるリレー（信号開閉器）やスイッチが望まれている。このような市場の要望に対し、メカニカルな動作を行う電磁リレーではパッケージ内に信号を伝達する接点と接点を駆動するための電磁石を組み込む必要があり、小型化の点で限界がある。そこで小型であることなどから従来

高周波信号のスイッチング素子として PIN ダイオードや GaAs MMIC (Monolithic Microwave IC) が用いられている。これら半導体素子は半導体の空乏層（チャネル）幅の制御により ON/OFF 機能を実現するため、スイッチング素子としての基本特性、

- ・インサクションロス（挿入損失：スイッチ/リレー ON 状態時、信号がスイッチ/リレーを通る際の減衰量＝ロス）：（2GHz において、0.5～1.0dB）、
- ・アイソレーション（絶縁特性：スイッチ/リレー OFF 状態時の信号線出力側への信号の漏れ度合い）：（2GHz において、15～30dB）

の両特性がトレードオフの関係になり、どちらか一方の特性に重視した設計となっている。従って、低損失で高絶縁であるデバイスの実現は市場要求として大きい。

一方、RF MEMS 技術は、半導体製造技術で培われた超微細加工技術すなわちマイクロマシニング技術を応用し、微小構造体からなる RF デバイスを創出する技術として定義され、各種スイッチ、レゾネータ、キャパシタ、インダクタ、フィルタ、などが RF MEMS 技術として報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。半導体式と異なり、空間に構造体を形成するため、絶縁性に優れ、従来得ることができなかった高い Q 値が実現するなど非常に期待が高い。中でも中空構造を持った微小機構部を能動的に動作することにより高周波信号を開閉す

* 立命館大学
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
Ritsumeikan University

1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577
** オムロン株式会社
〒619-0283 京都府相楽郡木津町木津川台 9-1
OMRON Corporation
9-1, Kizugawadai, Kizu-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0283

るデバイスは RF MEMS スイッチ/リレーと定義され、メカニカル動作を超小型で実現することが可能であり数多くの提案が行われている。スイッチとリレーの違いは駆動部と信号部が電氣的に絶縁しているかないかで区別され、絶縁しているものはリレーである。信号開閉方式として、高周波信号開閉に使用する可動接点と固定接点を直接接点させる方式を有接点型、あるいはオーム接触型 (Ohmic contact switches) と呼び、DC から高周波までの信号を扱うことができる。他には容量結合型 (Capacitive switches) と呼ばれる方式がある。アクチュエータにより信号線に対する容量値を変化させ、扱う周波数に対応した容量結合により信号経路を切り替えるものであり、DC 信号を開閉することはできない。いずれの場合も可動機構であるアクチュエータを有している。アクチュエータを動作する駆動方式によって、静電方式⁽³⁾⁽⁴⁾、電磁方式⁽⁵⁾、熱方式⁽⁶⁾等に分類することができる。加えて上述の駆動方式を組み合わせたハイブリッド駆動方式の提案も行われている⁽⁷⁾。多くの提案が報告されている背景として、接点の開閉信頼性を向上するため、特に復帰力を大きく設計する必要があるが、可動接点と固定接点を引き剥がすための復帰力が十分にとれず、安定した信号開閉ができない課題が挙げられる。筆者らは半導体プロセスとの親和性が高く、低消費電力である、静電方式のアクチュエータに効率よく力を発揮できる非線形ばね構造を用いた高周波信号開閉用 MMR (Micro Machined Relay) の開発⁽⁸⁾を進めている。

本論文では、高周波信号スイッチングを考慮した静電アクチュエータの非線形ばね構造を提案し、有限要素法による構造解析、製作プロセスとアクチュエータの試作結果、並びに本アクチュエータを用いた MMR の基本特性、長期開閉試験結果を示す。

2. 構造設計

〈2・1〉 基本構造 図 1 に開発した MMR の分解構造図を示す。

図 1 MMR の分解構造図

Fig. 1. Exploded view of the MMR.

MMR はガラス基板、シリコン基板 (可動電極基板) 及びキャップ基板の 3 枚で構成している。ガラス基板にはパイレックスガラス (コーニング社 #7740) を用い、基板には直線状に配置した入力信号線、出力信号線となる 2 本の信号線、その先端の固定接点、駆動用固定電極、固定電極上の保護膜及びボンディングパッドを形成している。可動部として単結晶シリコン基板を用い、固定電極と同じサイズの可動電極部を 2 箇所のアンカでガラス基板と固定する。アンカに接続している復帰ばね、及び可動電極中央部は可動接点部であり、可動接点部下面に絶縁膜を介して形成した可動接点からなる。また可動電極の周辺部下側 (ガラス基板と対抗する面) には非線形ばね構造を実現するために $100 \times 50 \mu\text{m}$ 角で約 $0.7 \mu\text{m}$ 高さの突起部を 8 箇所固定電極側の面に設けている。図 2 に固定電極側から可動電極側を見たときの可動電極の寸法と設置した突起部の位置を示す。

なお、可動電極ならびに接点部を外部環境から保護するために、キャップ基板を用いて減圧封止し雰囲気制御を行う。従って、ウエハからのチップ分割を通常のダイシング工程で行うことや、低コストのモールドパッケージを始め、様々な実装形態が可能である。

〈2・2〉 非線形ばね静電アクチュエータを用いた MMR の動作概要 図 3 に 2 箇所のアンカ部、アンカ部近傍の突起部、接点部を結んだラインの断面図 (キャップ基板を除く) を用いて、動作概要を示す。黒色で示されている部位が可動部であり、可動電極と復帰ばねを兼用している。

ガラス上の固定電極とシリコン基板間、すなわち駆動電極間に電圧を印加することで発生する静電引力によってシリコン基板がガラス基板側に引付けられ、まず突起部が固定電極上の保護膜と接触する (B)。この時点ではまだ可動接点と固定接点は接触していない。ここで電極間距離が狭くなっている分、初期位置よりも大きな静電引力によりシリコン基板は引き続きガラス基板側へ引き付けられ、可動接点が固定接点と接触し 2 本の信号線を電氣的に接続する (C)。電圧を除去すると、まず突起部から内側の可動電極で構成されたばね (突起部から外側のばねよりも大きいばね係数を持つ) 構造によって可動接点は固定接点から離れ、次いで復帰ばねによって突起部が保護膜から離れる。

図 2 可動電極に設置した突起部の位置

Fig. 2. Position of projection.

図3 MMRの動作原理

Fig. 3. Schematic diagram of the MMR utilized Electrostatic actuator.

MMRは接点の接触力が10mN以下と小さいため、接点材料として同一接触力に対して接触抵抗の低いAu系の材料を用いている。しかしAu系接点材料では粘着、溶着による復帰不良が起きやすいため、復帰力を十分とることが必要である。一般的な指標として、接触力の1/3程度以上の復帰力が安定な復帰動作を実現するために必要であると言われている。説明を簡単にするため線形ばねで保持された平行平板の静電アクチュエータを考える。最大復帰力 F_{RES} と電極間距離の関係は式(1)で表される。

$$F_{RES} = \frac{27\epsilon_0\epsilon_rSV^2}{8G^2} \quad (1)$$

ここで

ϵ_0 , ϵ_r : 真空の誘電率及び雰囲気気体の比誘電率
 S : 電極面積
 V : 印加電圧
 G : 電極間距離

とする。式(1)より最大復帰力 F_{RES} は電極間距離 G の2乗に反比例する。したがって、電極面積および印加電圧が一定の場合、復帰力を大きくするためには電極間距離を小さくする必要があることがわかる。しかし電極間距離を小さくすると接点間距離も小さくなり、接点間の絶縁耐圧が下がる、あるいはアイソレーション特性が悪くなるという問題が生じる。そこでSchlaak⁽³⁾は、ウェッジタイプのばね構造を用いて大きな復帰力を得ている。筆者らは、突起部を駆動電極間の内側に設けることで、段階的にばね係数が増大する独自の非線形ばね構造を考案した。本構造に

図4 有限要素法解析モデル

Fig. 4. Simulation model.

図5 復帰力有限要素法解析結果

Fig. 5. FEM simulation results of restoring force.

より、電極面積の増大や電極間距離の減少を行うことなく復帰力の向上を実現することができる。実際のMMR用静電アクチュエータについて、米国Coventor社の有限要素法構造解析シミュレータCoventorWareを使用し、解析を実施した。

図4に解析に用いた可動電極部の有限要素モデルの例を示す。材料には単結晶シリコンを用いており、アンカに接続する部位2箇所を完全拘束、固定電極部に可動電極が到達する距離において、接触部はZ軸方向へ移動しない拘束条件とした。1要素は四面体を用い、大きさは $30\mu\text{m}$ 角(接触部を除く)、厚さ方向は最小で3分割である。突起部の設置箇所を接点部近傍に設置した場合、接触力の大幅な低減につながり接触抵抗安定性に影響が出てくるが、可動電極周辺部に設置する場合は、突起部が無い場合と比較して接触力の減少が1割減程度に抑えられ、かつ復帰力の増大効果は得られるためシミュレーションモデルに反映し計算を行った。

図5に復帰力の解析結果を示す。突起部により、ばね負荷のグラフに屈折点(B)が現れ、前後ではばね負荷の傾きが変化していることがわかる。駆動電圧が24V、可動電極面積約 1.4mm^2 、電極厚み約 $22\mu\text{m}$ 、電極間距離 $2.95\mu\text{m}$ 、可動電極部を $50\mu\text{m}$ 切り欠くことで形成する復帰ばね(幅 $100\mu\text{m}$ 、長さ $750\mu\text{m}$)の場合、突起部を持たない線形ばねを使用した場合には 0.6mN の復帰力であったが、非線形ばね構造を採用した場合は 1.5mN の復帰力を得ている。なお、この

場合の接触力（計算値）は4.5mNである。

〈2・3〉 高周波設計 高周波信号に対応した線路設計とアクチュエータ構造について考慮する必要がある。素子を使用するアプリケーションと特性インピーダンスの整合を取るため、50 Ωの特性インピーダンスで設計を行った。高周波信号の伝送構造として一般的なマイクロストリップライン（誘電体を信号線と高周波グラウンドの間に挟む）構造を採用した場合、比誘電率が5程度で厚さが400 μmのパイレックスガラス基板を用いて、50 Ωの特性インピーダンスを実現するためには、600 μm~700 μmの信号線幅が必要になり、チップサイズやコストの増大を招く。そこで筆者らは原理的に信号線幅の制約が無く、安定的な高周波特性を得るためにグラウンドコブレナ（同一平面上に信号線と高周波グラウンド、さらに誘電体を挟んで高周波グラウンドを設置する）構造を伝送構造として採用し、ガラス基板裏面にグラウンド電極を形成し、駆動電極として使用するガラス基板上の固定電極を高周波グラウンドとして兼用する構造を採用した。従って、信号線幅は約300 μmとチップの小型化に貢献できている。さらに、アイソレーション特性を向上するため、信号線間の寄生容量（容量結合）を小さくすることを目的に、信号線上の接点部以外の可動電極除去（信号線上の2箇所400×560 μmの領域を可動基板より除去）、可動接点と固定接点が接触する面積の低減（30×70 μm/接点）、絶縁性の高いパイレックスガラス基板の使用などを本構造に採用した。また、高周波信号の干渉について考察すると、アクチュエータの駆動限界はkHz以下のオーダであるのに対して、扱う高周波信号の周波数は数GHzのオーダであるため、考慮する必要は無い。信号線の厚みに関しては、インサーションロスに影響を及ぼす信号線、パッケージの導体抵抗及び接点部の接触抵抗だけでなく、表皮効果の影響を排除することが必要となる。筆者らが提案するMMRでは信号線に厚さ2 μmのAuを使用した。従ってチップ単体では、表皮深さが1.0 μmになる6.2 GHz程度まではこのインサーションロスに対する影響はほとんど無いと考える。

3. 製作プロセス

本製作プロセスの特徴はSOI（Silicon On Insulator）ウエハとガラスウエハの陽極接合を組合せていることと、低融点フリットガラスを用いたアクチュエータ部の封止をウエハレベルで行っていることである。

SOIウエハの活性層（薄膜層）部を可動基板部として用いることが目的である。他のシリコン基板の薄膜化の手法としては、アルカリエッチングにおけるエッチストップを行うためにPN接合にバイアス電圧を印加するECE(Electro Chemical Etch stop)、あるいは高濃度のP層でエッチストップする手法がある。両者ともドーピングされたシリコンが機械的可動部となるため、内部応力あるいは膜厚方向の応力の傾斜による機械的挙動への影響を無視できない。また特にECEではプロセスが非常に複雑になる。これらと比較し、

図6 プロセスフロー

Fig. 6. Process sequence for the MMR fabrication.

本プロセスではSOIウエハの層間絶縁膜である熱酸化膜でエッチングを停止するため、可動部への高濃度ドーピングが不要となり、プロセスも簡略化できる。

図6にチップ断面図を用いたプロセスフロー図を示す。

まずSOIウエハの活性層部(25 μm厚)に駆動電極、接点、インターコネクション用ギャップ及び突起部をTMAHウェットエッチングにて形成する(1)。エッチング精度の再現性、均一性を向上するため薬液温度、濃度管理に加えてウエハ回転機構を備えたエッチング装置を使用した。次にスパッタで形成したAu系金属を可動接点に、熱酸化膜を絶縁膜に使用する(2)。一方、固定接点、固定電極、保護膜及

図7 ベアチップ，及びモールドパッケージ写真
Fig. 7. Photograph of a bare chip and a molding package.

びボンディングパッドをガラスウエハ上にスパッタなどで形成する(3)。ガラスウエハとSOIウエハを陽極接合した(4)後，SOIウエハのベース部をKOHで除去する。層間絶縁膜である熱酸化膜をバッファードフッ酸で除去し，最後にSOIウエハの活性層をドライエッチングによりばね形状にパターンニング(5)し，MMRの静電アクチュエータ部が完成する。その後，あらかじめアクチュエータ部と外部取り出し電極上に対抗する箇所へ座繰り加工を施したキャップ基板と上述のプロセスにより完成したアクチュエータ部を有する基板とを低融点フリットガラスを封着剤として，熱圧着接合することにより(6)，ガラスキャップを施す。最後にダイシングによりパッド部上側にあるガラスを取り除くことと同時にチップ個片に分割する。図7に完成したベアチップ，及びモールドパッケージ化したMMRの写真を示す。

4. 評価結果と考察

〈4・1〉 アクチュエータ特性 アクチュエータのばね負荷を評価した。超微小硬度計を利用し，加圧プローブでばねを押すことで，電極の変移量に対応するばね反力を測定している。図8に評価結果を示す。グラフ中(A)，(B)，(C)は図3における電極位置と同様である。評価デバイスはシミュレーションモデルと同様，可動電極面積約 1.4mm^2 ，電極厚み約 $22\mu\text{m}$ ，電極間距離 $2.95\mu\text{m}$ ，可動電極部を一部切り欠くことで形成する復帰ばね幅 $100\mu\text{m}$ ，長さ $750\mu\text{m}$ であり，設計値どおりの 1.5mN の復帰力を得ている。

〈4・2〉 MMRのDC特性 DC基本特性の代表例を表1に示す。可動接点が固定接点に接触する動作電圧は $17\text{--}20\text{V}$ であるが，接触抵抗の安定性を確保するため 24V を定格電圧と設定している。Switching timeは駆動電圧 24V を印加してから接触抵抗値が安定するまでの時間であり，接点バウンス(短時間の間に接点が接触，開離を繰り返す現象)を抑えるためにキャップ封止時の減圧条件で制御している。初期におけるチップ全体の抵抗値は配線部の寸法ば

図8 復帰力測定結果

Fig. 8. Measurement results of restoring force.

表1 DC特性

Table 1. DC characteristics (typ.).

Actuation voltage (V)	17-20
Switching time (μs)	300
Relay resistance (Ω)	0.4-0.6
Breakdown voltage, Signal to signal (V)	>200
Power consumption (mW)	<0.05

図9 電氣的耐久性試験結果例(1億回超開閉試験)

Fig. 9. Electrical Life Test measurement results (Over 100 million cycles).

らつきを含めてウエハ面内で $400\text{--}600\text{m}\Omega$ 内に分布している。接触抵抗としてのばらつきは $150\text{m}\Omega$ 程度であり，接触力としては十分であると考ええる。なお入出力信号間の絶縁耐圧は 200V 以上である。

駆動電圧 24V で $0.5\text{V}\text{--}0.5\text{mA}$ ， $1\text{k}\Omega$ の抵抗負荷を開閉試験条件(ホットスイッチング)として，電氣的耐久性試験を行った。 100Hz の矩形波を駆動信号として試験を行い，溶着判定，抵抗測定は接点部の電気信号を毎回モニタリングし，動作不良の有無を確認している。図9に開閉試験による接触抵抗値の測定結果を示す。 100 万回のスイッチングにつき1回の頻度で測定データをプロットした。試験期間を通じて初期値からの接触抵抗変動値は $200\text{m}\Omega$ 以内でインサーションロスに換算すると 0.05dB 以下の変動と同等であり，安定している。従って電氣的耐久性としては1億回以

図 10 高周波特性評価結果（インサージョンロス特性）

Fig. 10. RF characteristics measurement results (Insertion Loss).

図 11 高周波特性評価結果（アイソレーション特性）

Fig. 11. RF characteristics measurement results (Isolation).

上（1 秒間に 1 回の開閉動作で 3 年以上の開閉回数）が見込め、複数の機能を切り替える用途などにおいては十分な信頼性と考える。さらに試験を通して、溶着、粘着などの復帰不良は発生しないことも確認している。適用した Au 系の接点材料に対し、接触力、復帰力ともに適切な設定であると考察する。

〈4・3〉 MMR の高周波基本特性 モールドパッケージに実装した MMR を端子部までを校正可能に専用設計した測定治具とネットワークアナライザ（Agilent 8753E）を用いて 0.05-6GHz における帯域で高周波特性を評価した。

図 10 にインサージョンロス特性、図 11 にアイソレーション特性のデータを示す。各特性は、一般的な高周波スイッチング素子である PIN ダイオードや GaAs MMIC との 2GHz における各特性と比較すると、インサージョンロス特性 0.5dB 以下と比較して 0.4dB 以下であり、アイソレーショ

図 12 RF パワー入出力特性結果例

Fig. 12. RF power characteristics measurement results.

ン特性 30dB 以上と比較して 42dB 以上といずれも優れた特性である。しかも、半導体式ではトレードオフの関係にあるインサージョンロス特性とアイソレーション特性であるが、MMR は低損失で高絶縁を同時に実現できることが半導体式よりも優れた特性であると考察する。

しかしながら、3GHz を越える付近に波形の落ち込みが観測できる。これは、ワイヤ、リード部の伝送損に加えて特性インピーダンスのミスマッチングによる反射損失の影響であると考察している。0

〈4・4〉 MMR の RF パワー特性 接点 ON の状態で 2 GHz における連続波の入力パワーを 15dBm～33dBm（約 30mW～2W）まで投入したときの、入出力間の伝送特性を評価した。図 12 に入出力結果例を示す。評価サンプルは基板に実装したモールドパッケージ品で、駆動電圧 24V を印加し、入出力パワーの計測はパワーメータ（Agilent E3319B,E9300A）を用いた。試験条件全体にわたり入力パワーに対して約 0.4dBm（約 1mW）程度の損失で、出力端子に伝達している。従来、高周波スイッチング素子として用いられている GaAs MMIC においては、RF パワー 30dBm 程度を越えると非線形特性（飽和領域）が現れるが、MMR では観測されず、優れた線形特性を示すことが実験結果から明らかである。ここで試験を行った通電時間は概ね 1 分未満であり、損失分の発熱などによる特性への影響は考慮していないが、移動体通信機器用途としては問題ないとする。

5. まとめ

RF-MEMS スイッチ/リレー用静電駆動アクチュエータを高周波信号に対応した独自の非線形ばね構造を採用することで実現した。また、本アクチュエータを用いた RF-MEMS リレーである MMR の基本特性、並びに長期開閉試験を実施し、期待の効果を確認し、十分な能力を保有していることを示した。MMR は GHz オーダの広帯域な高周波信号を扱

う高度情報化社会において、超小型かつ高周波特性に優れるスイッチングデバイスとしての期待がますます高まっていくと考える。さらに高周波特性の広帯域化など従来型の半導体式では成し得ない特性向上を目指すためには、IC 高速化の手段と同様、配線長を短くするために CSP(チップスケールパッケージ)、フリップチップ等のパッケージ形態をとる必要があると考える。

今後は、更なる高周波特性改良や携帯電話などモバイル機器への搭載を容易にするための駆動電圧の低減などの性能改善を行っていく。

(平成 17 年 3 月 25 日受付, 平成 17 年 8 月 31 日再受付)

文 献

- (1) J. Jason Yao : "RF MEMS from a device perspective", J. Micromech. Microeng. 10, pp.9-38 (2000)
- (2) G. M. Rebeiz : "RF MEMS: Theory, Design, and Technology", John Wiley & Sons Inc. (2002)
- (3) H. Schlaak, F. Arndt, J. Schimkat, and M. Hanke : "Silicon microrelay with electrostatic moving wedge actuator", 5th International conference on microelectrooptomechanical systems and components, MST'96, pp.463-468 (1996)
- (4) P. M. Zavracky, S. Majumder, and N. E. McGruer : "Micromechanical Switches Fabricated Using Nickel Surface Micromachining", J. Microelectromechanical Syst., Vol.6, No.1, pp.3-9 (1997)
- (5) W. P. Taylor and M. G. Allen : "Integrated magnetic microrelays: Normally open, normally closed, and multi-pole devices", 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), pp.1149-1152 (1997)
- (6) D. C. Miller, W. Zhang, and V. M. Bright : "Microrelay packaging technology using flip-chip assembly", The 13th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS'00), pp.265-270 (2000)
- (7) Ph. Robert, D. Saïas, C. Billard, S. Boret, N. Sillon, C. Maeder-Pachurka, P.L. Charvet, G.Bouche, P. Ancey, and P. Berruyer : "Integrated RF-MEMS Switch Based on A Combination of Thermal and Electrostatic Actuation", The 12th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'03), Vol.2, pp.1714-1717 (2003)
- (8) M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, and S. Horiike : "Micromachined Relay which Utilizes Single Crystal Silicon Electrostatic Actuator", The 12th IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Conference: MEMS-99, Orlando, USA, pp.21-24 (1999)

積 知 範

(正員) 1967 年 7 月 2 日生。1993 年 3 月熊本大学大学院工学研究科修士課程修了。同年オムロン(株)入社。以来、MEMS センサ、RFMEMS スイッチの研究開発に従事。現在、技術本部先端デバイス研究所マイクロマシニンググループ主事。2004 年より立命館大学大学院総合理工学専攻博士後期課程在籍。IEEE ED/MTT 会員。

増 田 貴 弘

(非会員) 1975 年 9 月 14 日生。1998 年大阪市立大学工学部卒業。同年オムロン(株)入社。以来、MEMS センサ、RFMEMS スイッチの研究開発に従事。現在、技術本部先端デバイス研究所マイクロマシニンググループ。

宇 野 裕

(非会員) 1968 年 7 月 6 日生。1993 年 3 月岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。同年オムロン(株)入社。以来、電磁継電器、RFMEMS スイッチの研究開発に従事。現在、技術本部先端デバイス研究所マイクロマシニンググループ主事。

佐 藤 文 彦

(正員) 1978 年大阪大学基礎工学部卒業。同年オムロン(株)入社。以来、光半導体デバイス、MEMS デバイスなどの研究開発に従事。現在、技術本部先端デバイス研究所マイクロマシニンググループグループ長。応用物理学会、電子情報通信学会各会員。

今 仲 行 一

(正員) 1974 年大阪大学基礎工学部卒業。1979 年大阪市立大学大学院工学研究科応用物理博士課程修了、工学博士。スイス・ヌシャテル大学などを経て、1985 年オムロン(株)に入社。以来、光半導体デバイス、光集積デバイス、MEMS デバイスなどの開発に従事。現在、執行役員常務 技術本部長。2004 年より立命館大学客員教授。IEEE / LEOS / ED, SPIE, 応用物理学会

会員。

杉 山 進

(正員) 1970 年名城大学理工学部卒。1994 年東京工業大学より学位授与、工学博士。1965 年から 1995 年まで(株)豊田中央研究所にて、半導体歪ゲージ、シリコン圧力センサ、マイクロマシニング集積センサなどの開発に従事。1995 年より立命館大学教授。立命館大学マイクロシステム技術研究センター長。文部科学省平成 14 年度 21 世紀 COE プログラム拠点リーダー。IEEE, 応用物理学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会、エレクトロニクス実装学会会員。