

# MEMS 技術を用いた可変インダクタの設計

Variable Inductor Design with MEMS Technology

光野 正志 木村 圭吾 小室 貴紀† 小林 春夫 酒寄 寛† 安田 祐造 ††

群馬大学工学部電気電子工学科 〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

Tel: 0277-30-1788 Fax: 0277-30-1707 e-mail:k\_haruo@el.gunma-u.ac.jp

† アジレント・テクノロジー・インターナショナル(株) SOC テスト事業部 製品開発部

〒 192-8510 東京都八王子市高倉町 9-1 e-mail:{takanori\_komuro,hiroshi\_sakayori}@agilent.com

†† アナログチップデザイン(有) 〒 373-0818 群馬県太田市小舞木町 14-1 若旅ビル 205

Masashi Kono Keigo Kimura Takanori Komuro †

Haruo Kobayashi Hiroshi Sakayori † Yuzo Yasuda ††

Electronic Engineering Dept., Faculty of Engineering, Gunma University

† Agilent Technologies International Japan, Ltd., †† Analog · Chip · Design Inc.

**要約**— この論文ではMEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた可変インダクタ、及び可変させるためのアクチュエータの設計を行い、シミュレーションにより動作の一部を確認したので報告する。可変インダクタは携帯通信機器のキーコンポーネントの一つになり得る可能性が高いが、通常の Si LSI 上には実現は難しい。そこでその実現手段として、MEMS 技術の適用を検討した。

**キーワード** : MEMS, Variable Inductor, Mutual Inductance, Actuator, Heat Expansion

## I. 研究背景

可変インダクタは近未来の携帯通信機器のキーコンポーネントの一つになる可能性があり、また大きな市場が期待出来る。携帯電話に搭載されているインダクタは、1998 年で 27 億 3 千万個、年平均成長率は 20% であり、将来その 1% が可変インダクタになると仮定しても年間 8 千万個になる。このような大きな市場の要求に対し、可変インダクタを実現する手段の一つとして MEMS(Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術の利用を検討している。現在までに高い Q 値を持つインダクタ、キャパシタンス、絶縁性の高いスイッチの実現 [1]-[4] が報告されているが、MEMS 技術を用いた可変インダクタの実現例は少ない [5]-[9]。我々が提案する可変インダクタは、Si LSI 技術と親和性があり、また、同様の製造プロセス技術を用いることで可変キャパシタ、スイッチ等への応用も可能である。

## II. 可変インダクタのアプリケーション

電気回路においては、R (抵抗)、C (容量)、L (インダクタ) が基本となる受動素子である。抵抗と容量は (最近では

インダクタも) Si LSI にオンチップ化することが可能である。さらに、可変抵抗はゲート電圧制御による MOSFET を使用することで、可変容量もミラー容量、MOS 容量等を使用することで LSI 上に実現できる [1],[2]。これらの可変抵抗及び可変容量は、回路性能の最適化や調整可能なフィルタ・発振回路、自動ゲイン制御アンプのような、特性の調整可能な回路の実現に有用である。Si LSI 上に可変インダクタが実現出来ればさらにフレキシブルなアナログ回路が実現できる [5]-[9]。

可変インダクタのアプリケーションとして、我々は DC-DC コンバータ (スイッチング電源 [10]) とバンドパスフィルタ、VCO (電圧制御発振器) を考えている (図 1)。スイッチング電源に使用する場合、負荷電流が大きく変動する時には、インダクタンス値を小さくすることで高速応答を実現し、負荷電流が一定時には、インダクタンス値を大きくすることで低リップルを実現する。このように、動作状態に応じて、インダクタンス値を可変にする。また、LC バンドパスフィルタや VCO に使用する場合には、容量 C だけでなく、高い Q 値を持つインダクタ L を変化させることで、広い範囲で中心周波数を制御する [3],[4]。これは、1 つの携帯電話が複数の通信方式に対応するために必要である。

## III. スパイラルインダクタの設計

まず、MEMS 技術を利用して L の値が固定であるスパイラルインダクタの設計・試作を行なった (図 2)。スパイラルインダクタの設計については、Brayan 等によって、実験式や計算式が与えられている [11],[12]。これらの式より、スパイラルインダクタの設計を行い、比較検討を行う為に、方形型、八角型、円形型の 3 種類の形状の

スパイラルインダクタの巻き数、内径サイズを変えた全24パターンでのレイアウトを行った(図3)。また、この中の方型スパイラルインダクタ(16巻き、内径サイズ最小)を用いて、可変インダクタを提案し、シミュレーションを行った。表1に方型スパイラルインダクタの性能(設計値)を示す。

表1 方型スパイラルインダクタの性能(設計値)

形状	共振周波数	方型型	
巻数・内径 [ $\mu\text{m}$ ]	$f_{SR}[\text{MHz}]$	L 値 [ $\text{nH}$ ]	Q 値
16巻・最小	650	216	4.33
16巻・300	420	396	3.52
8巻・最小	2800	28.7	9.66
8巻・300	1350	77.3	6.68
8巻・600	820	154	5.09
8巻・900	600	241	4.26
3巻・300	6400	9.26	16.2
1巻・300	45000	1.00	67.6

#### IV. MEMS 技術を用いた可変インダクタの設計

コイル間に働く相互インダクタンスは、それぞれの自己インダクタンスと、インダクタの形、大きさ、位置、透磁率で決まる。我々はこの位置に着目した。提案する可変(相互)インダクタは、二つのインダクタを使用し、インダクタを上下、又は左右に動かすことでインダクタの距離、即ち位置を変化させ、相互インダクタンス(インダクタを貫く磁束の数)を変えるものである。その構成と原理を図4-図7に示す。

##### (i) 可変インダクタの設計

図8に設計した可変インダクタの構成を示す。先の(i)で設計した方型スパイラルインダクタ(配線材料AlSi=厚さ:2 $\mu\text{m}$ 、16巻き、内径サイズ最小)を2つ使用し、発生力の強い熱膨張アクチュエータを用いて、インダクタを物理的に動かし、二つのインダクタの距離を変化させる。つまり、距離を制御することにより、相互インダクタンスを変化させる。この構成では、熱膨張アクチュエータを4つ使用している。上のスパイラルインダクタを、熱膨張アクチュエータを用いて動かし、インダクタ間の距離を変化させた時の、相互インダクタンス値をシミュレーションにより求めた。また、このアクチュエータを横向きに設置すれば、水平方向の動きが可能となる。

##### (i-a) 可変インダクタのシミュレーション結果

設計した可変インダクタをMEMS設計の標準CADツールであるCoventorWare2004を用いて設計及びシミュレーションを行なった。シミュレーション結果より、インダクタを鉛直方向に5 $\mu\text{m}$ 移動させた時は、4.3nH変化し、30 $\mu\text{m}$ 動かした時には20.1nH変化することを確認した(図9)、また水平方向に5 $\mu\text{m}$ 移動させた時の変化量は0.24nH、

40 $\mu\text{m}$ 移動させた時に、相互インダクタンスは最小値を取り、その時の変化量は4nHであることをシミュレーションにより確認した(図10)。ここで、自己インダクタンスは216nHとほぼ一定となった。図9より、相互インダクタンスは、縦方向のコイル間の距離に線形的に変化していることが確認出来る。傾きは平均約0.6で、最初の5 $\mu\text{m}$ から10 $\mu\text{m}$ が傾きが多少大きい。また、図10より、横の移動距離(位相変化量)において、相互インダクタンス値の極小値が存在する。この点は、図11のような状態である。つまり、上の配線が下の配線間の間に入っている時に、相互インダクタンスは最小値を取る。今、配線幅を16 $\mu\text{m}$ 、配線間隔を44 $\mu\text{m}$ に取っているため、相互インダクタンス値は約35 $\mu\text{m}$ で最小値を取るが、配線幅と配線間隔の関係を変えれば、少ない移動距離で最小値を取る。

##### (ii) 熱膨張を用いたMEMSアクチュエータの設計

我々は先行研究で「金属は熱を与えると膨張する」という性質を利用した熱膨張アクチュエータを提案した[13]。これはバイメタル構造を対称に構築し、アクチュエータに応用したものである。構造としては4種類の金属を上下対称(または左右対称)に積層した形になる。その金属とはAu(金)、Ti(チタン)、P-SiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>である。これらは金属自身の熱膨張係数によって、熱が加えられると機械的に曲がる。これがアクチュエータとしての働きをする。一番外側の金属(金)に電流を流すことにより、金属の熱膨張を促し、全体がその反対の方向に曲がるという原理で動作する(図12)。このモデルで、1 $\mu\text{m}$ の上昇、下降に必要な温度上昇量は10Kであることを、CoventorWare2004を用いたシミュレーションにより確認した。

##### (ii-a) 熱膨張アクチュエータの改良

先に提案した熱膨張アクチュエータ[13]は、上下対称の構造であり、電流を流すことによって、上下どちらにも動くという特徴を持っているが、消費電力(動作必要発熱量)が大きいというデメリットがある。そこで、消費電力を低減化した構成を検討した(図13)。

##### (ii-b) 低消費電力熱膨張アクチュエータの提案

図13の提案構成において、CoventorWare2004でシミュレーションを行い、Auの幅を固定し、厚さを変えた場合の、温度上昇量における金属全体の上昇量を求めた(図14)。熱を加える金属の断面積S(=金属の幅×厚さ)が小さいほど、金属の温度上昇は大きくなるが、シミュレーション結果では、金属の厚さとスイッチ部の上昇量の関係は比例していない。これは、金属の厚さが薄いと、熱による温度上昇量は大きいですが、スイッチ全体を上押し上げる力が弱いことを表している。従って、温度上昇量が大きく、かつスイッチ全体を上押し上げる力が強い、厚さと幅を検討する必要がある。Auの厚さを変えた構成を作製し、全体を1 $\mu\text{m}$ 上に上げるのに必要な温度(熱量)を

シミュレーションにより求め、構成を検討した。

### (ii-c) シミュレーション結果

図 13 の構成で、[13] での消費電力の 20 分の 1 程度で、アクチュエータとして動作することが確認できた。この時のアクチュエータの駆動電圧は 94V、電流は 640mA、動作速度は約 1.5kHz である。

### (iii) 静電気力を用いた MEMS アクチュエータの設計

静電アクチュエータの特徴としては、動作速度が速く、集積化しやすく、消費電力が少ないというメリットがあり、電子回路との融合が容易である。特に、電極板を櫛歯上に配置したものを、櫛歯型静電アクチュエータと呼び、大きな静電気力が得られる為、多く用いられている。基板に固定した電極と、バネで弾性支持した可動の電極が櫛歯構造になっており、電極間に電圧を加えると静電気力によって斥力が働き、これがアクチュエータとしての動作をする (図 15)。この櫛歯型静電アクチュエータを用いた可変インダクタを提案した (図 16)。

### (iv) スイッチを用いた可変インダクタの構成

可変インダクタのアプリケーションとして、大きな変化量を必要とする場合がある。その要求を解決する為に、複数のインダクタを用いて、スイッチにより切り替えて使用する構成を用いる (図 17, [4])。この構成により大きな変化量が得られ、また、提案する可変インダクタを用いることで連続可変が可能となる。

### (v) 3 つのインダクタを用いた可変インダクタの設計

3 つのインダクタで構成される、アクチュエータを用いない可変インダクタを提案した。その原理を図 18 に示す。アクチュエータを用いないことから、低コスト化、小型化が期待出来る。相互結合された 3 つのインダクタはそれぞれ、自身で発生する磁束による自己インダクタンスと、他のインダクタが発生する磁束による相互インダクタンスを持っている。この時、真ん中のインダクタの入力信号を制御することによって、磁束変化を起こし、相互インダクタンスを変化させることが出来る。その構成を提案した。(図 19)

## V. まとめと今後の課題

MEMS 技術を用いた可変インダクタを提案し、CovectorWare2004 を用いて、シミュレーションによりその動作を確認した。今後は、熱膨張アクチュエータのさらなる低消費電力化・高速化、静電気アクチュエータの検討、及び可変インダクタの試作、アクチュエータを用いない可変インダクタの設計・試作を行う。

### 謝辞

スパイラルインダクタの試作は、富士電機システムズ (株) の協力で行なわれた。

## 参考文献

- [1] S. D. Senturia, *MicroSystem Design*, Kluwer Academic Publishers, Boston (2001).
- [2] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, K. A. Jose, *RF MEMS and Their Applications*, John Wiley & Sons (2003).
- [3] G. M. Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design and Technology*, John Wiley & Sons (2003).
- [4] H. J. De Los Santos, *RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*, Artech House (2002).
- [5] P. L. Gammel, B. P. Barber, V. Lubecke, N. Belk, M. R. Frei, "Design, Test, and Simulation of Self-Assembled Micromachined RF Inductors, SPIE Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS Digest, vol.3680, p.582-591 (1999).
- [6] Y. Yokoyama, T. Fukushige, S. Hata, K. Masu, A. Shimokohbe, *On-Chip Variable Inductor Using MEMS Technology*, Japanese Journal of Applied Physics, vol.42, No.4B, pp.2190-2192 (2003).
- [7] H. Sugawara, Y. Yoshihara, H. Ito, K. Okada, K. Masu, *Wide-Range RF Variable Inductor on Si CMOS Chip with MEMS Actuator*, IEEE European Microwave Conference, pp.701-704 (Oct. 2004).
- [8] C.-M. Tassetti, G. Lissorgues, J.-P. Gilles, *Reconfigurable RF Systems Based on Tunable MEMS Inductors*, IEEE European Microwave Conference, pp.1165-1168 (Oct. 2004).
- [9] P. Park, C. S. Kim, M. Y. Park, S. D. Kim, and H. K. Yu, *Variable Inductance Multiplayer Inductor with MOSFET Switch Control*, IEEE Electron Device Letters, vol. 25, no.3, pp.144-146 (March 2004).
- [10] M. H. Rushid (editor-in-chief), *Power Electronics Handbook*, Academic Press (2001).
- [11] H. G. Dill, *Designing Inductors for Thin Film Applications*, Electronic Design, pp.52- 59 (1964)
- [12] 青木由隆、上芳夫、本城和彦、「ウェハレベル CSP 技術による銅配線、絶縁層を利用した低損失インダクタの実現」、エレクトロニクス実装学会誌、7[3]、p247- 254 (2004)
- [13] M. Kono, T. Komuro, H. Kobayashi, K. Kimura, H. Sakayori, Y. Yasuda, *MEMS Design for LSI Tester Applications*, 2004 IEEE International Analog VLSI Workshop, pp.293- 296, Macao SAR, China (Oct. 2004).

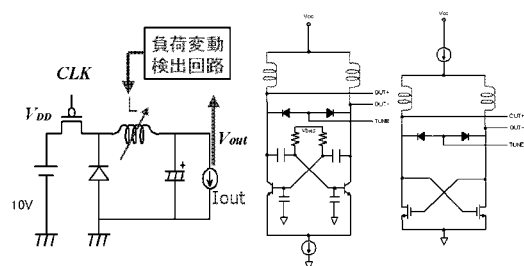


図 1: 可変インダクタの応用例 左: チョップパ型降圧型スイッチング電源回路: 低リップル・高速応答を実現、右: VCO (電圧制御発信器): 中心周波数可変。

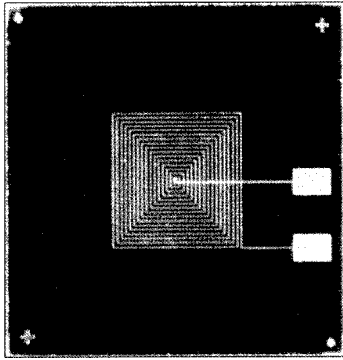


図 2: MEMS ファンダリ (富士電機システムズ) で試作した MEMS テクノロジを用いたスパイラル・インダクタのチップ写真。

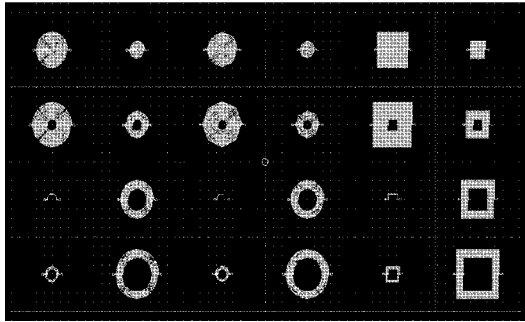


図 3: 設計した全 24 パターンのスパイラルインダクタのレイアウト: 円形型、八角形型、方形型の 3 形状にそれぞれ内径と巻き数を変えている。

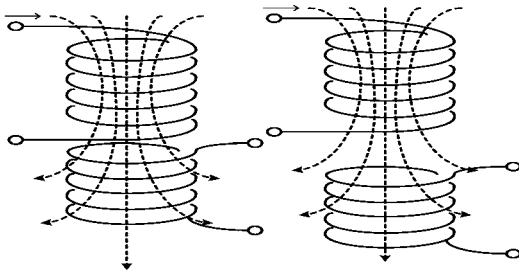


図 4: 可変 (相互) インダクタンスの原理図. インダクタ間の距離を物理的に変化させることでインダクタ間を貫く磁束の数 (= 相互インダクタンス) を変化させる。

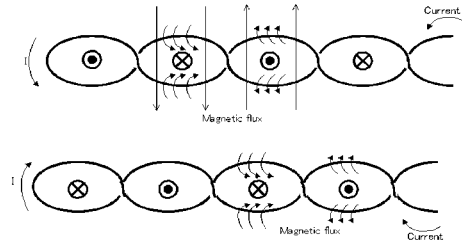


図 5: 可変 (相互) インダクタの可変原理 (a). スパイラルインダクタを水平に動かすことで相互インダクタンスを変化させる。

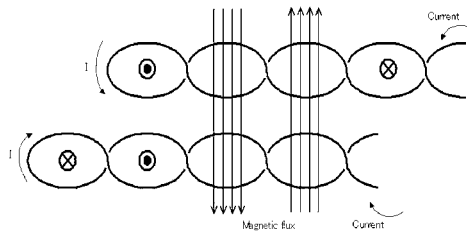


図 6: 可変 (相互) インダクタの可変原理 (b). 磁束の向きが等しくなる時、相互インダクタンスは最大となる。

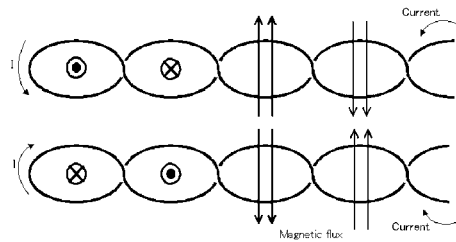


図 7: 可変 (相互) インダクタの可変原理 (c). 磁束の向きが逆になる時、相互インダクタンスは最小となる。

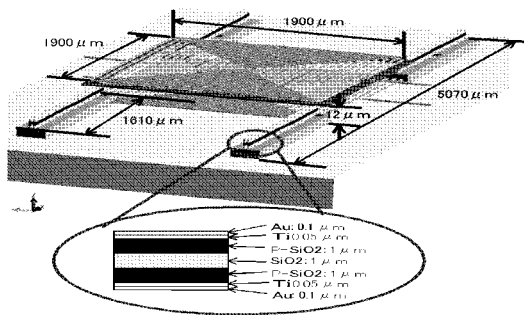


図 8: 提案した可変インダクタの構成. 上のスパイラルインダクタを、4つの熱膨張アクチュエータによって上下に動かすことで、インダクタ間の距離を変化させ、相互インダクタンスを変化させる。

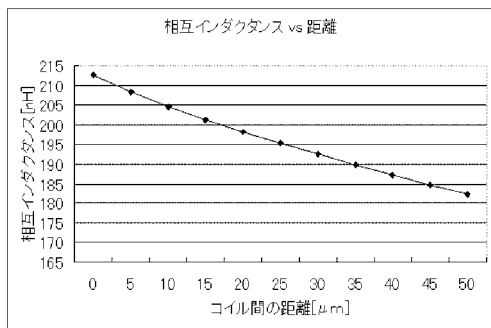


図 9: 上のコイルを鉛直方向に動かした時の相互インダクタンス特性: 横軸を鉛直方向の移動距離、縦軸を相互インダクタンスとおく. コイル間の距離に比例して、相互インダクタンスが減少していることが確認出来る。

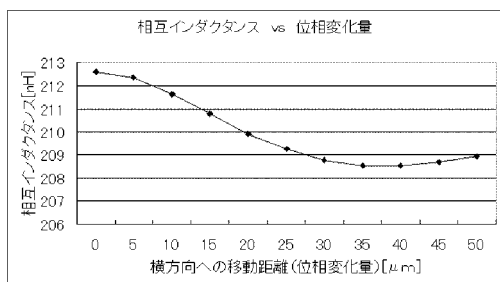


図 10: 上のコイルを水平方向に動かした時の相互インダクタンス特性: 横軸を水平方向への移動距離、縦軸を相互インダクタンスとおく. コイルの移動距離に依存して、相互インダクタンスが変化していることが確認出来る。

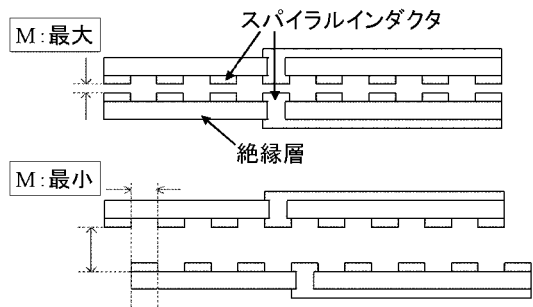


図 11: 可変インダクタの断面図: 相互インダクタンスが最大となる時と最小となる時のインダクタの関係図. 水平方向の移動の時、配線と配線が重なり合う時、相互インダクタンスは最大となり、配線間に下のインダクタの配線が入った時に、最小となる。



図 12: 熱膨張アクチュエータのシミュレーション結果. 下の金属に熱を加えた時、先端部分が上昇していることが確認出来る。

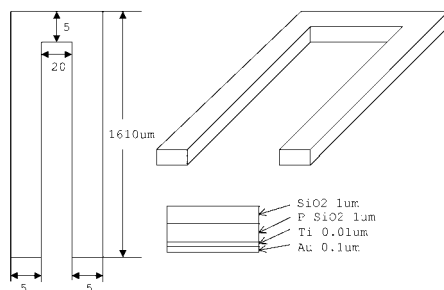


図 13: 改良した熱膨張アクチュエータの構成. Auの厚さを  $0.1 \mu\text{m}$  にしたことで、1K上げるのに必要な発熱量は少なくなり、幅も小さくすることで、同時に金属の上昇量も大きくなった。

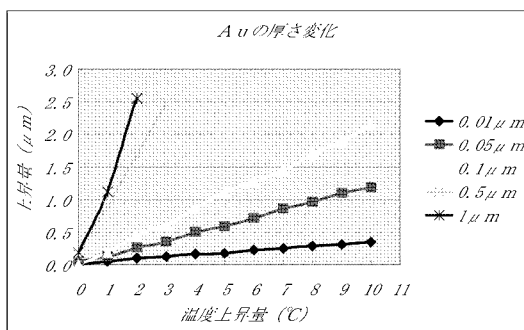


図 14: Au の厚さをパラメータとした時の、温度変化による金属の上昇量特性. 熱を加えた金属の厚さと金属の上昇量は比例関係にある.

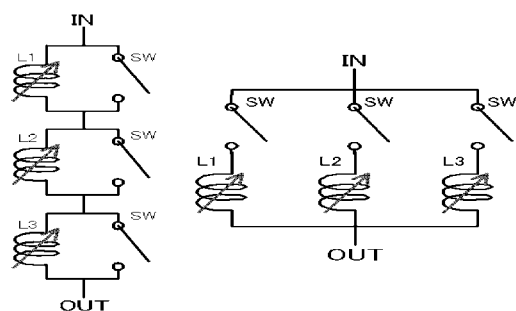


図 17: スイッチ付きインダクタを直列、及び並列接続した回路図. スイッチを切り替えることによってインダクタンスを大きく変化させる. それぞれを可変インダクタにすることで連続可変を実現する.

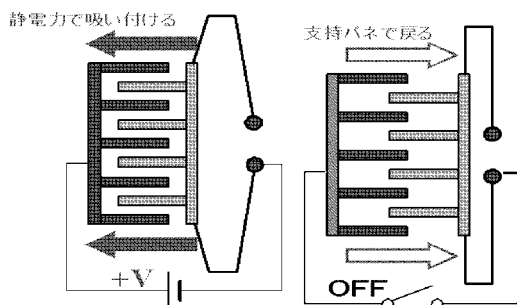


図 15: 静電気力を用いたアクチュエータの原理図. 電圧を印加し、静電気力の斥力によって電極を吸い付ける. 戻すときは支持バネによって元の位置に戻る. これが、アクチュエータとしての動作をする.

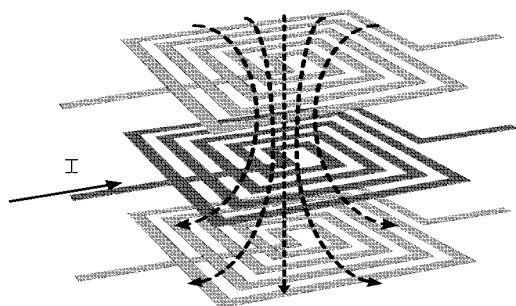


図 18: 提案するアクチュエータを用いない可変インダクタの原理図. 真ん中のインダクタの入力信号の制御によって、上下間の相互インダクタタンス (貫く磁束の数) を変化させる.

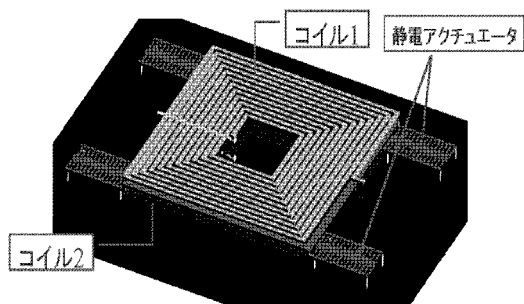


図 16: 提案する静電気アクチュエータを用いた可変インダクタの構成. 4 隅の静電気アクチュエータによって上のコイル 1 を動かしコイル間の距離を変化させることで、相互インダクタタンスを可変させる.

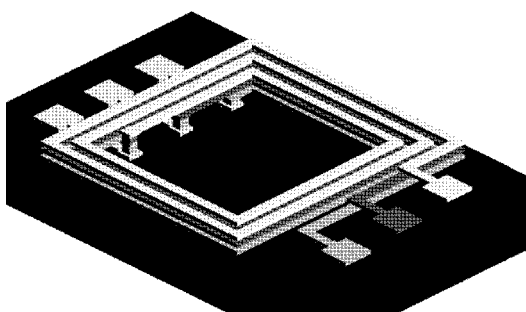


図 19: 提案するアクチュエータを用いない可変インダクタの構成: 真ん中のインダクタの入力信号の制御によって、相互インダクタタンス値を変化させる.