

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation



鈴木 健一郎 (Kenichiro SUZUKI, Ph. D.)

立命館大学 理工学部 機械工学科 教授

(Professor, Department of Mechanics Engineering, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

情報通信学会 電気学会

受賞：EEE Electron Devices Society 1990 年度 Best Paper Award (Paul Rappaport Award) (1991 年 12 月) 日経エレクトロニクスジャパン・ワイヤレス・テクノロジー・アワード優秀賞 (2013 年 5 月 31 日)

著書：鈴木健一郎：肥後矢吉編 谷川、鈴木、磯野、荻、土屋、石山「小さなものをつくるためのナノサブミクロン評価法」第 5 章 (pp.129-158) コロナ社 (2015 年 7 月 17 日) 鈴木健一郎：RF-MEMS の設計と製作技術、リアライズ理工センター (2006 年 6 月 30 日)

研究専門分野：MEMS センサ 共振器 アンテナ 可変フィルタ

あらまし 次世代通信用フィルタには高周波・広帯域対応、低損失、小型、周波数可変などの種々の要求がある。現在主流の SAW^{*1} (Surface Acoustic Wave) フィルタは、周波数特性がほぼ固定されている為、複数の通信方式に対して異なるフィルタを切り替えて対応している。このため、今後マルチバンドが進むに従って、回路規模がますます増大するという問題もっている。LC 可変フィルタにおいては、主にキャパシタンスを変化させて周波数の可変を行うことができることから、大きな静電容量可変率をもつキャパシタが必要とされる。今までに電極間距離や電極面積を変化させてキャパシタンスを可変するという多くの研究が進められてきたが、10 倍以下の小さな可変率に限られていた。

本研究は、高い比誘電率 80 をもつ水をキャパシタの電極間に搬送することによって、80 倍の大きな静電容量変化を起こす流体 MEMS キャパシタを高周波回路に応用することを目的にしている。今回、UHF 帯周波数可変 LC フィルタの研究について述べる。9 段階に可変する帯域阻止フィルタ^{*2} (BEF) を設計評価した。BEF は、1 GHz 以上の高周波帯域で使用でき

るようにするため、メアンダイナダクタと流体可変キャパシタをモノリシック構造で作製した。流体可変キャパシタは、純水を 8 個のキャパシタセルに順次充填することにより最大 11.1 pF と増大して、初期キャパシタンス (0.36 pF) に対して最大可変率約 31 倍をもつことが実証できた。試作した流体可変 BEF は、中心周波数 0.92~4.52 GHz の帯域で周波数可変することができた。

1. はじめに

無線システムは、通信、制御、認証に関する広い応用領域で使用されており、現在、データ・画像伝送、電力伝送、人体通信、医療、センサに関連する新しい応用技術が進んでいる。しかし、技術の急速な進歩に伴って、従来の技術では十分に対応できない課題が次々と明らかになってきた。通信技術の分野においては、スマートフォン等に代表される通信端末において使用される周波数の広帯域化[1]に対応して、通信端末に搭載されるフィルタの増加と RF フロントエンド回路^{*3} 規模の増大が深刻な問題となってきた。これを解決するために、広い帯域にわたって周波数を変化させることができる周波数可変フィルタが要求されている。また、今日、無線 LAN (WLAN) による端末機器間の無線接続が急速に普及しているが、広帯域化に加えて、周波数可変とマッチング機能の革新 (リコンフィギュラブル等) が強く望まれている[2][3]。今後、無線通信がますます広汎に利用されていくにつれて、低損失化、小型化、高周波化、広帯域化、周波数可変、マッチング等の機能向上を進めることがますます重要である。

移動通信端末で使用される UHF 周波数帯 (470 MHz~2.5 GHz : 約 5.3 倍の周波数可変) で使用される LC ローパス・フィルタ^{*4} を例にとって考えると、全周波数帯域をカバーするには 30 倍以上の静電容量変化を実現することが必要である。しかし、現在主流の SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタは、圧電材料を使用するために、シリコン IC とモノリシック集積化することができないことに加えて、静電容量可変率が約数%程度と小さいという制限をもっている。このため、SAW デバイスを使用して広い範囲の周波数

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

可変を行うデバイスを作製すると、寸法が大きくなってしまいう問題がある。

近年、MEMS (Microelectromechanical systems) 技術を利用した可変キャパシタが注目されている。MEMS 技術は、IC 回路と集積化に適しており、主に電極間のギャップを変化させることによって静電容量を変化させることが可能である。図 1 に、静電アクチュエータを利用した MEMS 可変キャパシタを示す[4]。中央の電極は、その側面に設けられた静電アクチュエータによって上下に移動させられる。これにより、中央の電極とその上に設けられた固定電極の間のギャップが変化して、両者の間の静電容量が変化する。試作した可変キャパシタは、3~32 pF までの約 10 倍の静電容量可変率をもっていた。この可変率は、今までに報告された MEMS 可変キャパシタの中で最大である。この他に、MEMS バイモルフ構造を用いた可変キャパシタが報告されている。これは、静電気力駆動で生じるプルイン^{*5}を避けるために、片持ち梁構造体に圧電体薄膜を堆積して機械構造体を駆動させるという改良がなされたものである[5]-[7]。しかし、今まで報告された可変キャパシタの中で、一つのデバイスで全 UHF 帯をカバーできるものは未だないのが現状である。

筆者らのグループは、大きな比誘電率をもつ純水をキャパシタの電極間に出し入れすることで、図 2 に示すように、80 倍の静電容量可変率をもつことが可能な流体可変 MEMS キャパシタを提案した[8]。そして、キャパシタとチップインダクタからなる UHF 帯の低域通過フィルタを作製して、13 倍の周波数可変を実証した[9]。更に、使用周波数の高周波化を目指して、寄生要素の少ない薄膜スパイラルインダクタを用いた帯域通過フィルタの作製を行った[10]。

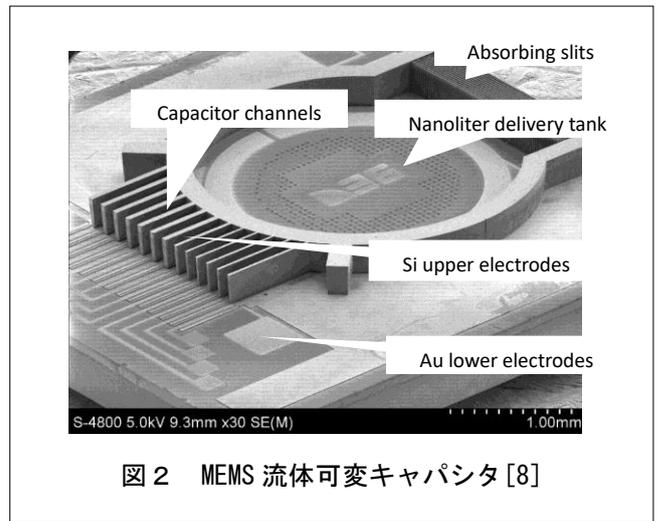


図 2 MEMS 流体可変キャパシタ [8]

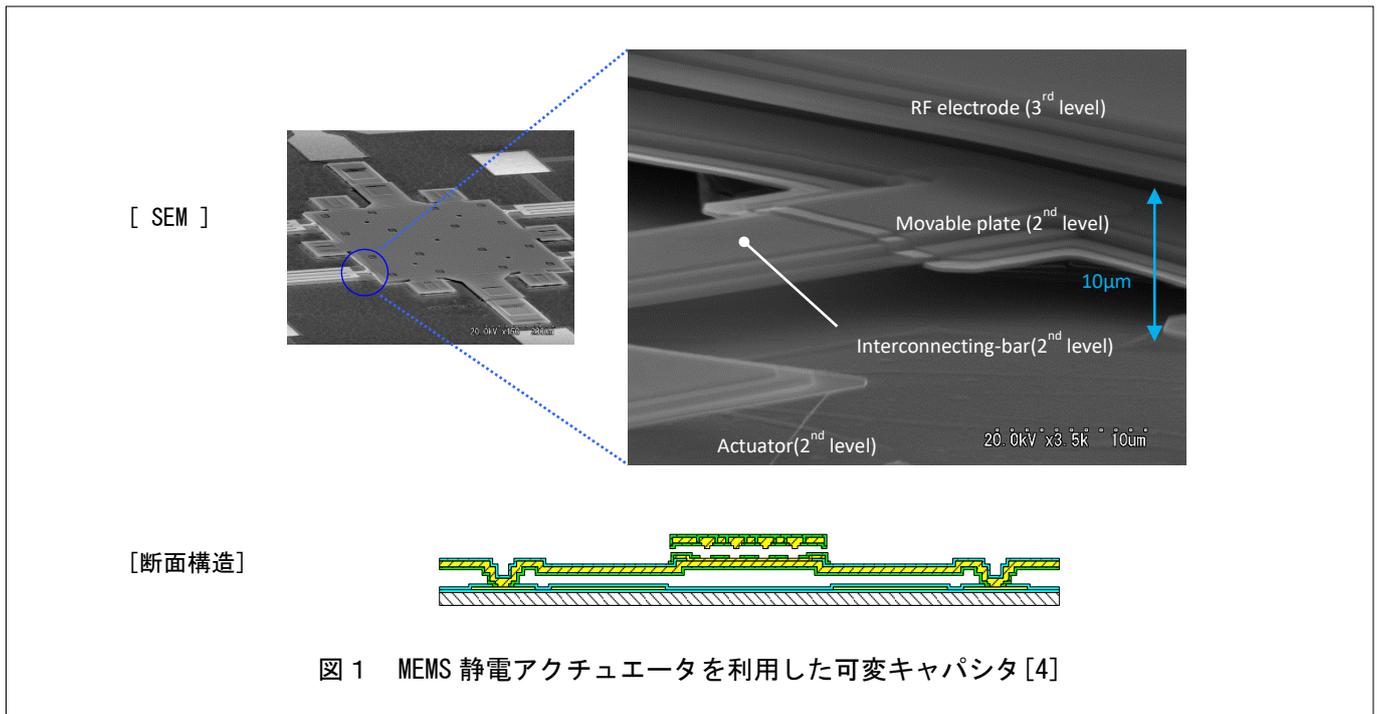


図 1 MEMS 静電アクチュエータを利用した可変キャパシタ [4]

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

しかし、このフィルタは、図 3 に示すように、チップインダクタとシリコン流体 MEMS チップのそれぞれを FR-4 基板の上でボンディングワイヤで結線したものであったために、1 GHz 以上の高い周波数で特性が著しく劣化するという問題をもっていた。この問題を解決するには、寄生成分を抑制する為にインダクタと流体 MEMS キャパシタをモノリシック構造で作製することが必要である。モノリシック構造は、同時にデバイスを小型化するのにも役立つ。一方、キャパシタの狭い電極間で液滴を双方向に駆動することを目標に、EWOD*6 (Electrowetting on dielectric) 原理[11][12]を利用した液滴駆動の研究を行った[9]。EWOD 駆動法は、すでに実用化されているバブルジェット方式や圧電方式などの液体駆動方法と比べて、熱を用いず、小型であり、また、可動部分を持たないため信頼性が高いという利点がある。さらに、EWOD は、液滴の管路内に電極を作製するだけで液滴を搬送することができるため、液滴を駆動する構造が簡単であるという特徴があり、移動体通信端末用途の可変フィルタの実現に適していると期待される。

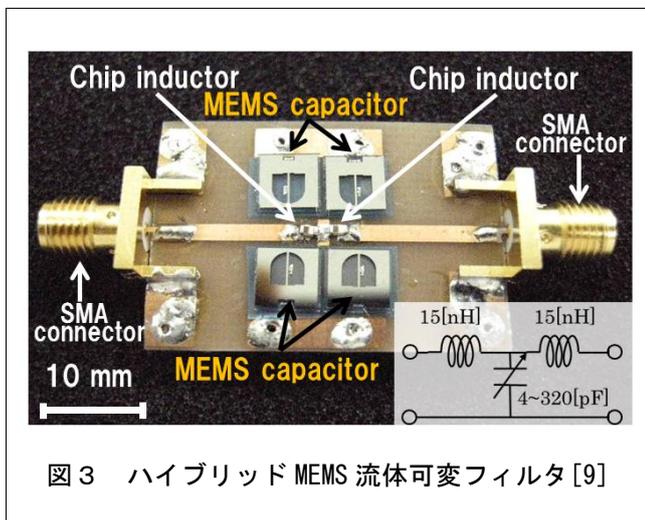


図 3 ハイブリッド MEMS 流体可変フィルタ [9]

本研究は、高周波システムに課せられた深刻な課題をエレクトロニクスの機能強化のみに頼らずに、MEMS 技術を活用した流体搬送を新たに取り入れることによって、高周波特性を大幅に改善するという新しい着眼点をもっている。今回、UHF 帯で動作する 10 倍以上の周波数可変フィルタの実証を示すことを

主な目的にした。また、流体駆動技術を RF 回路と集積化する技術についても簡単に紹介する。

2. 高周波可変デバイスの原理

2.1 可変帯域阻止フィルタ (BEF)

LC 可変フィルタは、主にキャパシタンスを変化させて周波数可変を行う機能デバイスであり、周波数を広帯域に可変するには、大きな静電容量可変率をもつキャパシタが必要である。筆者らは、キャパシタ電極の間に純水を挿入することを利用して、静電容量変化率 80 倍を実現できることに注目した。高周波デバイスにこの可変キャパシタを応用することを実証するために、一つのインダクタと一つのキャパシタから構成できる最も簡単な帯域阻止フィルタ (Band Elimination Filter: BEF) を試作評価することにした。今回試作した可変 BEF の回路構成を図 4 に示す。

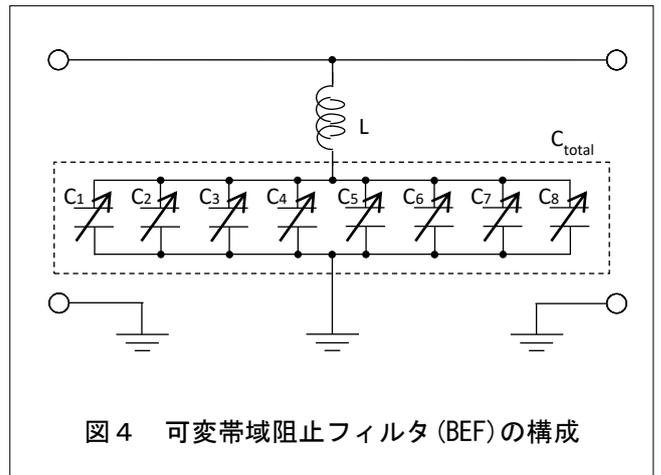


図 4 可変帯域阻止フィルタ (BEF) の構成

メアインダクタのインダクタンスは 3.2 nH、可変流体 MEMS キャパシタを構成するセル数は 8 とし、各セルの静電容量 (C_1 - C_8) をフィルタが 0.5~6 GHz の範囲で動作するように設計した。ここで各 C_n は、電極間に純水を満たした状態に遷移することによって、それぞれの初期値が 80 倍に増大する。図 5 に、この可変 BEF の周波数特性を回路シミュレータ Ansoft Designer SV2 を用いて計算した結果を示す。これより、阻止帯域の中心周波数 (f_c) を 0.6~5.8 GHz の間で変化させることが可能であることが確認できる。

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

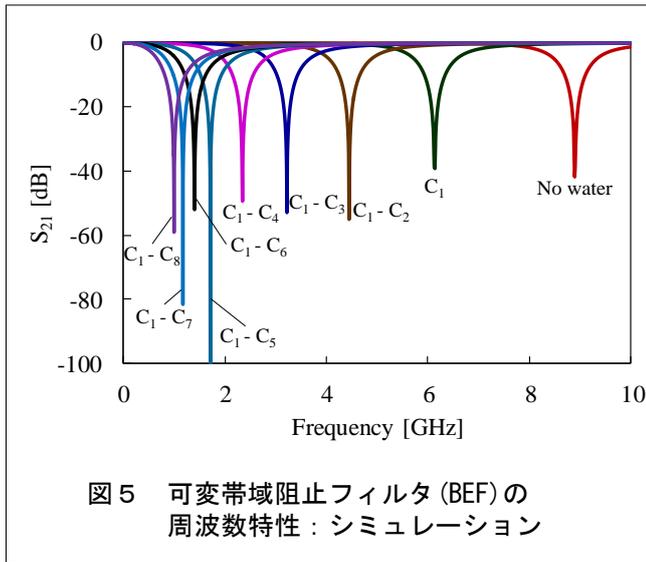


図5 可変帯域阻止フィルタ (BEF) の周波数特性：シミュレーション

2.2 流体搬送

図6に、EWODを利用した液滴搬送原理を示す。ガラス表面上に分割された二つの電極を設け、この上を絶縁膜と撥水膜で被覆した構造を作製する。分割された電極の間に置かれた液滴（一方の電極との接触面積は他方のものよりかなり大きくする必要はある）は、撥水膜表面と約110°程度の接触角をもって接触し、丸帽子の頭頂をもつ表面形状を形成する。この二つの電極の間に電圧を印加すると、液滴と撥水膜との間の接触角は、以下のYoung-Lippmann方程式に示すように減少する。

$$\cos \theta_v = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2t\gamma_{SL}} V^2$$

ここで、電圧を印加しないときの液滴の接触角を θ_0 、真空中の誘電率と絶縁膜の比誘電率をそれぞれ ϵ_0 、 ϵ_r 、絶縁層の厚さを t 、液体-固体間の表面張力を γ_{SL} と表示した。この式から、電極に印加する電圧を増加させると、接触角が減少することがわかる。この接触角の減少は、固体-空気界面の表面張力 γ_{S0} が電圧印加によって増大したことに対応している。 γ_{S0} が大きくなったことにより、この力に釣り合うために液滴の接触角が減少したのである。接触角がある値よりも小さくなった時（約70°）に、液滴は接触面積が小さな電極の方向に移動し始める。ここで、液滴と電極との間に設けられた絶縁膜が存在することが重要である。これがない時には、液滴と電極との間には約10nmの薄い電

気二重層が存在するだけであるため、電極に1V以下の小さな電圧を印加するだけで（トンネル）電流が流れてしまう。この結果、液滴・電極界面に大きな電界を発生させることができなくなる。絶縁膜はこの電流の発生を防止する働きがある。しかし、上の式よりわかるように、絶縁膜の厚さを薄くすることが液滴搬送に必要な電圧を低減するのに有効である。

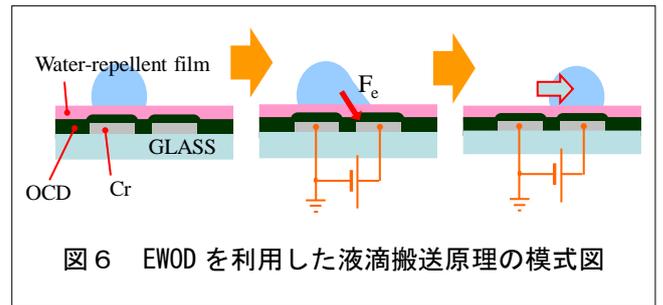


図6 EWODを利用した液滴搬送原理の模式図

3. 流体 MEMS 高周波可変デバイス

3.1 構造

可変 BEF の全体構造を図7に示す。ガラス基板上にメアンダインダクタと高周波伝送線路 (CPW) が形成されており、T-junction を用いてインダクタと流体

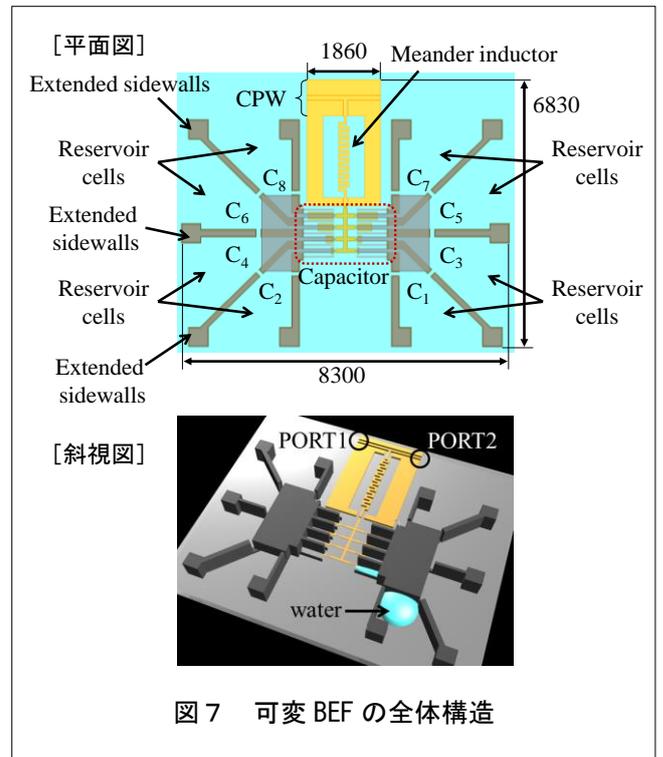


図7 可変 BEF の全体構造

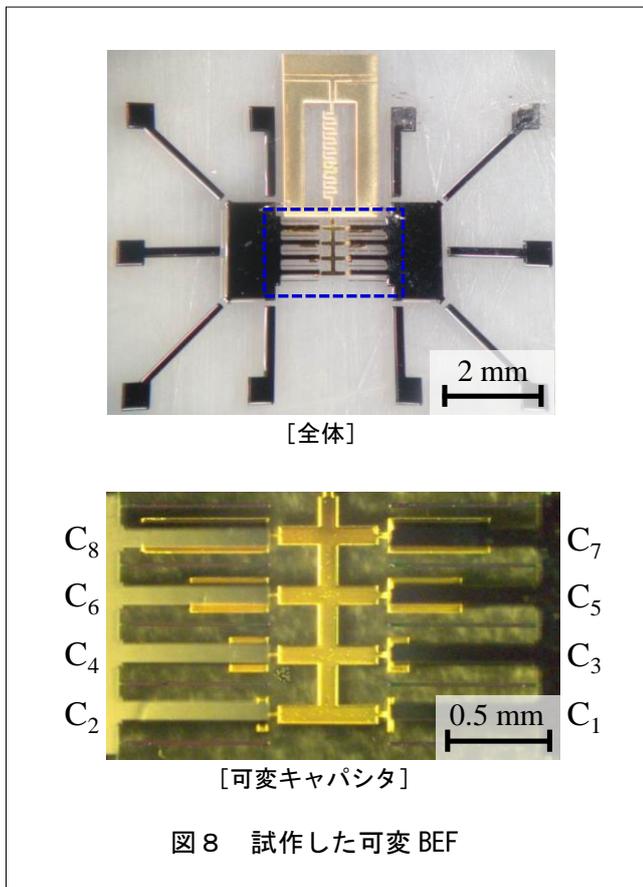
ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

可変キャパシタの直列回路が CPW に並列に接続されている。可変キャパシタを構成する 8 個のキャパシタのそれぞれの上部電極は、シリコンから形成されており、ガラス基板上に設けられた金属下部電極と 20 μm のギャップで向かい合っている。また、それぞれのキャパシタセルに純水を充填する際に、隣に漏れ出ないように Si 壁によって分離された 8 個の Reservoir cell が配置されている。デバイス寸法は 8300 \times 6830 μm^2 である。

3.2 作製

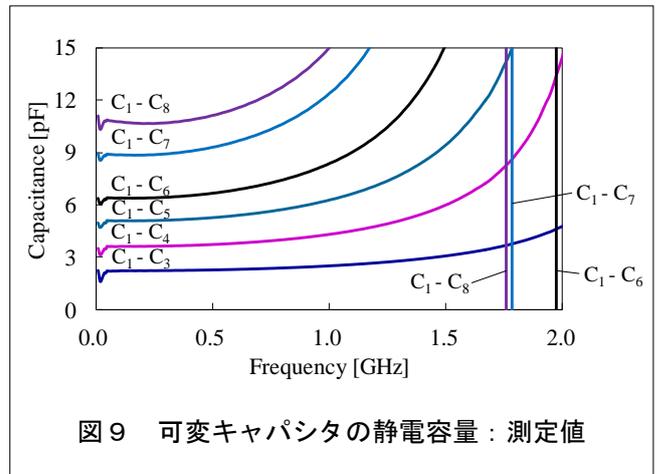
可変 BEF は、4 枚フォトマスクから構成されるバルクサーフェスマイクロマシニング技術⁷を用いて作製された。ガラス基板 (PYREX, コーニング#7740) と SOI シリコン基板をそれぞれ加工した後、陽極接合を用いて両方の基板を接合した。試作したデバイス写真を図 8 に示す。可変キャパシタの二つの電極が、Au 及び Si からそれぞれ構成されているのがわかる。



3.3 評価

試作したデバイスの高周波特性をベクトルネットワークアナライザ (Agilent 社 E8364C) を用いて評価した。

最初に、試作した可変キャパシタの静電容量を周波数に対して評価した。純水を小さいキャパシタセルから順次手で充填していったため、水が充填されていない状態を含めて 9 個の測定データが得られた。図 9 に、6 個のキャパシタンスの測定値を周波数に対して示した。キャパシタセルに純水が充填される毎にキャパシタンスが増加して、すべてのキャパシタセルに純水を充填した時には 11.1 pF ($f = 0.5 \text{ GHz}$) になった。これは、初期キャパシタンス (0.36 pF) の 31 倍に相当する。理論では、キャパシタンス変化率は 80 となるはずであるが、配線の寄生容量 (0.26 pF) の影響によって初期キャパシタンスが増加したために、キャパシタンス変化率が小さくなった。



次に、可変 BEF の高周波特性を評価した。その結果を図 10 に示す。純水をキャパシタセルに充填すると、キャパシタンスが増加するため、中心周波数が低周波側へ移動することが実証された。全てのキャパシタセルに純水が充填された時、中心周波数は 0.92 GHz まで減少した。このことから、今回作製した可変 BEF は、初期状態の中心周波数 (4.52 GHz) に対して約 4.9 の大きな中心周波数変化率をもつものであることがわかる。可変 BEF から得られた中心周波数変化率 (約 4.9) は、キャパシタンス変化率 31 から算出した

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

中心周波数変化率（約 5.6）よりも若干小さいが、これは、メアンダインダクタに発生する寄生容量と可変キャパシタに発生する寄生インダクタンスの影響によって、BEF 特性が劣化したと推定される。

今回の結果から、インダクタと可変キャパシタとを集積化した流体可変キャパシタは、UHF (0.3~3 GHz) 全帯域で使用できることが実証された。

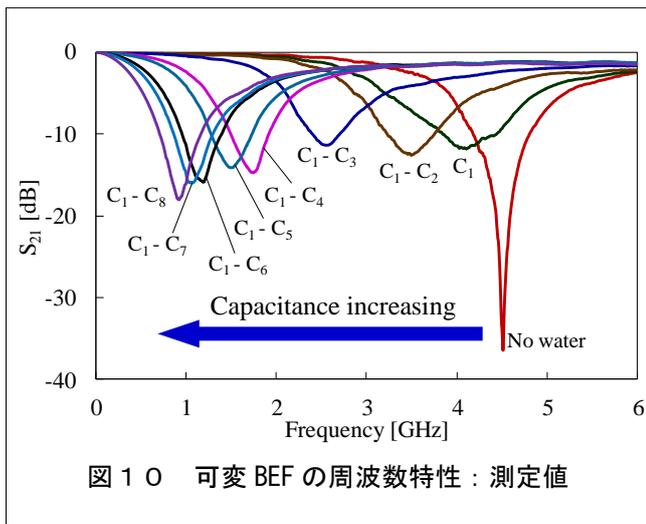


図 10 可変 BEF の周波数特性：測定値

3.4 課題と解決アプローチ

流体可変キャパシタについて、以下の課題が残されている。

- (1) 可変キャパシタの電極間ギャップを狭くすると、駆動電圧が増大する。10 μm ギャップの場合には 150 V の電圧が必要であった[13]。この駆動電圧を低減させるために、AC 電圧を印加する動的駆動方法が検討されている[14]が、駆動電圧を大きく低減

することは困難なようである。筆者らは、駆動電圧低減を目指して、広い電極間ギャップが許容できる平面キャパシタ構造を提案した[15]。この構造は、静電容量可変率が約 30 に半減するのが欠点であるが、依然として大きな静電容量可変率を実現することができる。現在、このデバイスの液滴搬送評価を行っている。

- (2) 純水は、すぐに汚れてしまう性質があるため、短時間で純水の抵抗が低下してしまうという問題がある[16]。純水の高周波特性の経時変化を評価したところ、抵抗値の低下は水の蒸発に大いに依存していることが明らかになった[17]。水の蒸発を防ぐためには、流路を完全に封止することが必要である。図 11 に、3-D 印刷技術を利用して作製した流路をもつ可変キャパシタデバイスを示す[18]。このデバイスの経時変化評価結果は、大いに興味深いものである。

4. 将来展望とまとめ

本研究で取り上げたデバイスは、いずれも現在の高周波コンポーネント/システムにおいて強く望まれている機能（低損失、広帯域、周波数可変、インピーダンスマッチング）を飛躍的に向上するのに役立つものである。例えば、従来の SAW フィルタを利用する可変フィルタは、数%の周波数可変機能をもっているが、本研究で開発する BPF（帯域通過フィルタ）を用いると、10 倍以上の周波数可変が可能となる。今回無線通信において、最も関心が高い UHF 帯の周波数を主に取り上げたが、本研究の成果は、ミリ波レーダ等のさらに高い周波数帯にも適用することが可能である[19]。

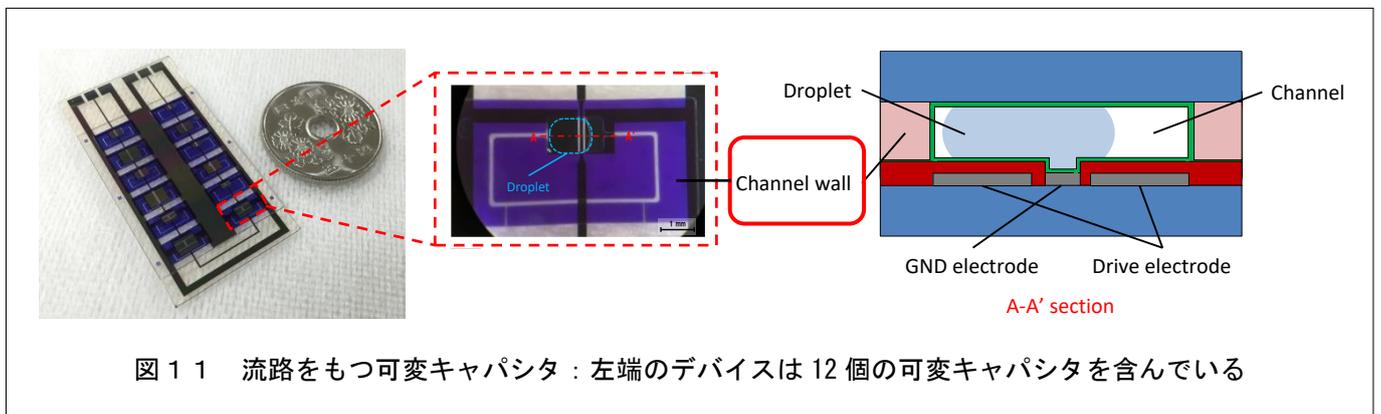


図 11 流路をもつ可変キャパシタ：左端のデバイスは 12 個の可変キャパシタを含んでいる

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

ミリ波レーダは、ヒューマンエラーによる事故を未然に防ぐために、車両自らが危険を検知して自動制御を行うプリクラッシュ・セーフティ技術として、現在、大きな注目を集めている。また、本研究をアンテナに適用すると、流体形状が自由に変化することを利用して、広い帯域に適合するリコンフィギュラブルアンテナを実現することが可能となる[20]。以上のように、本研究の成果は、高周波分野において今後広く利用されることが期待できる。

用語解説

*1 SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタ

圧電材料の表面に設けた金属電極に電圧を印加して圧電構造体を機械共振させると、表面を伝搬する波を発生させることができる。この表面波は、強い周波数依存性をもっているためにフィルタ回路に応用することができる。

*2 帯域阻止フィルタ(Band Elimination Filter: BEF)

特定の周波数帯を除去するフィルタ回路。直列配列した L と C の回路を伝送線に並列に挿入することによって実現できる。

*3 RF フロントエンド回路

電磁波の送受信を行うための回路であり、高い周波数をもつ電磁波とこれよりも低い中間周波数 (IF) で動作する信号処理回路との間で相互に信号変換を行う機能をもつ。

*4 LC ローパス・フィルタ

インダクタとキャパシタから構成される低損失回路で、伝送線に直列 L と並列 C を接続すると、低域周波数だけを通過させる低域通過 (ローパス) フィルタとなる。

*5 プルイン

機械可動構造体を静電気力で変化させることを考える。可動構造体に働く静電気力は距離の 2 乗に反比例するために、構造体の変位が増大していくと、静電気力が次第に大きく増大するようになる。一方、ばねの復元力は、変位に比例して増大するだけである。このため、可動構造体の変位がある値を超えると、静電気力とばね復元力との間の力のつり合いが

破れて平衡が成り立たなくなる。この現象をプルインと呼ぶ。一般に、プルインは可動構造体が初期距離の約 1/3 だけ変位したときに起こる。

*6 EWOD (Electrowetting on dielectric)

絶縁膜で被覆した電極を用いて流体に電圧を印加すると、流体が接触している電極表面の表面張力が変化する。この力の変化は、固体表面の濡れ性変化となって表れる。この性質を利用すると、固体表面に置かれた流体を変形させることができる。

*7 バルクサーフェイスマイクロマシニング技術

一般に、シリコン基板内部を加工するのがバルクマイクロマシニングであり、シリコン基板表面に構造体を形成するものをサーフェイスマイクロマシニングと呼ぶ。二つのシリコン基板の間にシリコン酸化膜を挟んで互いに接合した基板 (SOI 基板) を利用して、一方のシリコン基板内部を加工すると、これは他方の基板からみると、その表面に構造体を形成することに相当する。このような加工方法は、単結晶シリコンという優れた材料を利用して、機械構造体を容易に作製できるという利点がある。

参考文献

- [1] 総務省 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴 <http://www.tele.soumu.go.jp/search/myuse/summary.htm>
- [2] 澤井 繁, 三浦 直樹, 春山 信一郎, 眞田 幸俊: “2.4GHz 帯と 2.5GHz 帯向けのリコンフィギュラブル RF-MEMS フィルタの測定,” 社団法人 電気通信学会, 信学技報, (2006).
- [3] 西野 有, 橘川 雄亮, 李 相錫, 井上 博元, 吉田 幸久, 宮崎 守泰: “RF-MEMS 反射型帯域可変フィルタ,” 社団法人 電気通信学会, 信学技報, (2007).
- [4] H. Konishi, M. Nishiyama, J. Suzuki, Y. Tezuka, A. Komai, Y. Suzuki, and K. Suzuki, “Built-in Upwards-Bending Electrostatic Actuator of Three-Level-Structural Variable Capacitor,” Dig. of The 14th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France, pp.447-450, 2007.

ピコリットル流体搬送の誘電率変化を利用した広帯域 MEMS 高周波可変デバイスの研究

Study on wide-band frequency variable RF-MEMS devices utilizing change in permittivity generated by pico-liter liquid transportation

- [5] T. Kawakubo, T. Nagano, M. Nishigaki, K. Abe and K. Itaya, "Piezoelectric RF MEMS tunable capacitor with 3 V operation using CMOS compatible materials and process," Tech. Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, (2005)
- [6] Robert L. Borwick III, Philip A. Stupar, Jeffrey DeNatale and Robert Anderson, "A HIGH Q, LARGE TUNING RANGE, TUNABLE CAPACITOR FOR RF APPLICATIONS," The Fifteenth IEEE International Conference on, Micro Electro Mechanical Systems, pp.669-672, (2002)
- [7] J.K. Luo, M. Lin, Y.Q. Fu, L. Wang, A.J. Flewitt, S.M. Spearing, N.A. Fleck and W.I. Milne, "MEMS based digital variable capacitors with a high- k dielectric insulator," Sensors and Actuators A 132, pp. 139-146, (2006)
- [8] 鈴木健一郎：「MEMS 可変キャパシタとそれを用いたフィルタ装置」(特願 2009-236210)、平成 21 年 10 月 13 日、特許第 4855508 号：平成 23 年 11 月 4 日
- [9] K. Fukuda, K. Kitamura, R. Kanda, H. Tanigawa, and K. Suzuki, "Low-Pass Filter with Fluid MEMS Variable Capacitor," Proceedings of the 26th Sensor Symposium, Tokyo, The Institute of Electrical Engineers of Japan, pp.111-115, Oct. (2009) .
- [10] T. Yamanaka, N. Fukushima, H. Tanigawa, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Development of Tunable Band-Pass Filter for Use in UHF Wide Band Applications," Proceedings of the 27th Sensor Symposium, Matsue, The Institute of Electrical Engineers of Japan, pp.152-156, Oct. (2010) .
- [11] T. Yasuda, S. Harada and K. Daimon, "Microfluidic Dispensing Device Using Wettability Gradient and Electrowetting," PROCEEDING OF THE 24TH SENSOR SYMPOSIUM, pp.138-141, Tokyo, (2007)
- [12] H. Moon, S. Kwon Cho, R. L. Garrell, and C.-J. Kim, "Low Voltage Electrowetting-on-dielectric," JOURNAL OF Applied Physics, Vol. 92, No. 7, pp.4080-4087, (2002).
- [13] Y. Matsunami, T. Yamanaka, and K. Suzuki, "EWOD Droplet Transportation in a Closed Channel with a 20 μm Narrow Gap," Proceedings of the 3rd Integrated MEMS Symposium, Tokyo, The Japan Society of Applied Physics, pp.39-43, Sep. 2011.
- [14] H. Fujii, T. Nishihara, T. Nishino, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Dynamic driving of liquid for use of MEMS variable capacitors," Proceedings of the 7th Integrated MEMS Symposium, Niigata, The Japan Society of Applied Physics, 29pm1-D-4, Oct. 29, 2015.
- [15] T. Nishimura, Y. Yamada, Y. Furuno, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "A widely frequency variable UHF bandpass filter with fluid MEMS capacitors," Proceedings of the 5th Integrated MEMS Symposium, Sendai, The Japan Society of Applied Physics, 7AM2-E-3, Nov. 5-7, 2013.
- [16] K. Ishida, K. Kitamura, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Equivalent RF Circuit Model on Fluid MEMS Capacitors," IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol. 131, No. 1, pp.35-39, Jan. 2011.
- [17] K. Ishida, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Drift of Electrical Characteristics over Time for Fluid MEMS Capacitors," IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol. 131, No. 11, pp.388-393, Nov. 2011.
- [18] S. Kanazawa, T. Nishihara, Y. Shibasaki, Y. Ogawa, H. Fujii, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Development of a Small RF Variable Capacitor Integrated with Automatic Fluid Carrying System," Digest of 2016 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, ANA Cronwne Plaza Kyoto, Kyoto The Japan Society of Applied Physics, 10P-7-116L, Nov.8-11, 2016.
- [19] Y. Shitanaka, T. Furutsuka, and K. Suzuki, "Fundamental research on variable frequency fluid MEMS antenna," Proceedings of the 9th Integrated MEMS Symposium, Hiroshima, The Japan Society of Applied Physics, Oct. 31, 2017.

この研究は、平成 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 28 年度に実施されたものです。