

# RF-MEMS デバイス

RF-MEMS Devices

板谷 和彦 川久保 隆

■ ITAYA Kazuhiko

■ KAWAKUBO Takashi

快適なユビキタス社会の実現に向けて、無線技術は著しい進化を遂げている。今後、通信速度の高速化や接続の快適性を追求すると、携帯端末を代表とする無線機器内部の部品、特に受動部品数の増大が大きな問題となってくる。これらに対して、部品の大幅な小型化を可能にする RF-MEMS (Radio Frequency-Micro Electro Mechanical System : RF メムス) 技術が注目されている。

東芝は、圧電薄膜における原子層レベルでの配向性を制御する技術を開発し、これを RF-MEMS に適用することで、無線機器を小型化するうえで鍵となる受動部品のうち、チューナブルキャパシタを小型化かつ高性能化することに成功した。LSI などの半導体デバイス作製プロセスとプロセスの互換性が高く、この技術により、今後チューナブルキャパシタやフィルタなどの受動部品と LSI がワンチップ化できるなど、次世代無線機器を大幅に小型化できる道が開けた。

Wireless communication systems have undergone a remarkable evolution to realize a comfortable ubiquitous society. With the constant demand for higher communication speeds and seamless connection, however, the increase of components in personal terminals, especially passive devices, is becoming a serious problem. In this situation, radio-frequency microelectromechanical systems (RF-MEMS) technology has recently been attracting considerable attention.

Toshiba has developed a technology for atomic-order control of orientation in thin-film piezoelectric materials, which has been adapted to RF-MEMS devices such as filters and tunable capacitors. This process technology is compatible with LSI processes, and both miniaturization and high performance have been realized. This technology will make possible the further miniaturization of next-generation wireless terminals with, for example, passive devices and an LSI in one chip.

## 1 まえがき

ユビキタス社会においては、携帯電話システムに代表される無線通信機器が重要な役割を果たすことが期待されており、その実現に向けて、無線技術が著しい進化を遂げている。携帯電話を例にとると、デジタル信号処理技術や LSI 技術、実装技術などの進歩により、大幅な小型化が可能になり、カメラやマルチメディアなど多くの付加機能の搭載が可能になってきている。本格的な到来を迎える第3世代携帯電話では、欧州やアジア、米国などの複数の無線システムへの対応や、多数の周波数帯を効率利用するために、既にデュアルモード、トリプルモードといった複数の無線システムを搭載した携帯電話の開発が進みつつある。通信速度の高速化への潜在的な要求を考慮すると、次世代携帯電話システムにおいては、この傾向は更に加速するものと思われる。

これらの携帯端末において問題となるのが、部品点数の増加である。半導体技術をベースとする LSI は、今後も微細化技術を軸に比較的容易に小型化が進む一方、フィルタをはじめとする受動部品は、これ以上の小型化が難しく、外付け部品として残り、コストも高いといった問題があった。

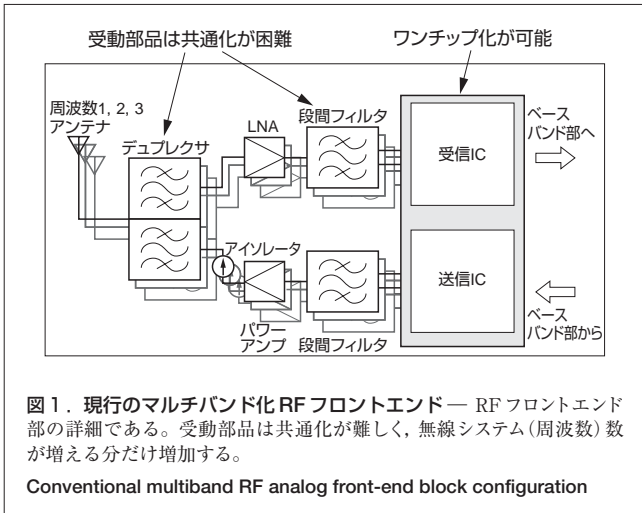
これに対して、超小型の共振器やスイッチが作製できる

RF-MEMS (Radio Frequency-Micro Electro Mechanical System) 技術が注目されている<sup>(1)</sup>。この技術そのものには、動作電圧が高い、あるいは対応可能な周波数帯域が狭いなどの問題があった。東芝は、この問題を解決するために、圧電薄膜の構成原子の配向を制御できる独自のナノテクノロジーを適用して、圧電型 RF-MEMS 技術の開発を行っている。ここでは、チューナブルキャパシタを中心として、圧電型 RF-MEMS 技術への取組みについて述べる。

## 2 マルチバンド化に伴う受動部品の問題

一般的な無線システムは、RF フロントエンド、アナログ/デジタル (AD) 変換部、デジタル信号処理部の三つのブロックから構成されている。AD 変換部及びデジタル信号処理部に関しては、CMOS (相補型金属酸化膜半導体) 技術を用いて、LSI 化されている。

一方、現行の W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access) システムを例に取り、RF フロントエンドを少し詳しく図1に示した。この図に示すように、LNA (低雑音増幅器) やミキサ部など半導体で構成された能動素子から成る回路部分とともに、フィルタやデュプレクサ (送受分波器) など、セラ

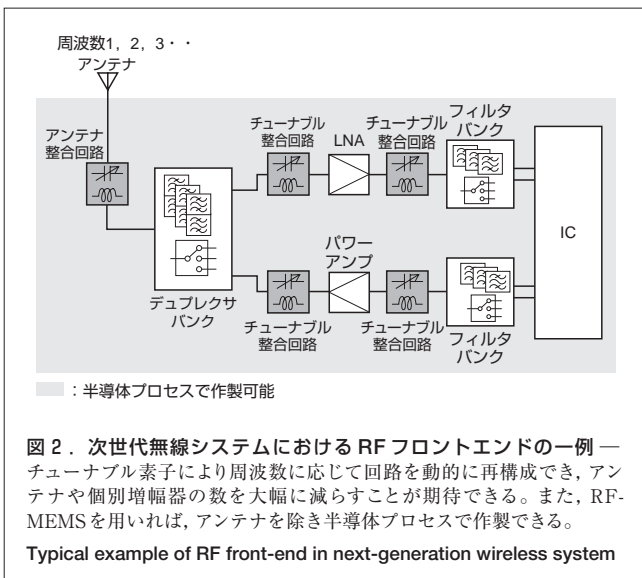


ミックス材料やバルク結晶材料を加工して製作された多くの受動部品で構成されている。しかし、厳しい無線システム仕様を満足するためには、これらの受動部品を半導体技術により置き換えることは困難である。

デュアルモード、トリプルモードといった複数の無線システムや多くの周波数帯に対応する際、前述のAD変換部やデジタル信号処理部に関しては、CMOS技術の微細化及び回路設計やソフトウェア上の改善による小型化が見込まれるため、搭載する無線システムの数が増えても、サイズの急な増加を引き起こすことはない。

一方、受動部品群は、無線機器に搭載する無線システムごとに別々に必要となるため、コスト面やスペース確保の面で大きな課題となっている。

次世代無線システムで期待されるRFフロントエンドの一例を図2に示す。キャパシタやインダクタといった受動部品を可変型にし、チューナブル整合回路を構成することで、各周波



数やシステムごとに回路そのものを動的に再構成でき、アンテナや個別増幅器の数を大幅に減らすことが期待できる。

### 3 高配向圧電薄膜技術を用いたRF-MEMSデバイス

#### 3.1 RF-MEMSデバイス

MEMS技術とは、機械的な微小構造を主に半導体基板上に作り付け、極小のアクチュエータやセンサ、共振器といったデバイスを作製するものである。機械構造を導入することで、半導体デバイスでは得ることのできない高い性能とサイズの小型化を同時に実現することができる。この技術をRFフロントエンドに適用したのがRF-MEMSデバイスである。

RFフロントエンドに適用される代表的なデバイスの概略構造を図3に示す。これらのチューナブルキャパシタ、スイッチ及びフィルタを図2で示す整合回路やスイッチに適用することにより、サイズ、特に厚さを飛躍的に薄くすることができる。また、薄膜成膜技術を中心とする作製プロセスが半導体プロセス技術と親和性が高いため、LSI素子との一体化が原理的に可能であるなど、次世代携帯端末機器の薄型化や小型化を可能にする有望な技術として注目を集めている。フィルタやデュプレクサに関しても、FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) と呼ばれる共振器構造のRF-MEMSデバイスが使われ始めており<sup>(2)</sup>、今後RFフロントエンドに急速に浸透していくものと考えられる。

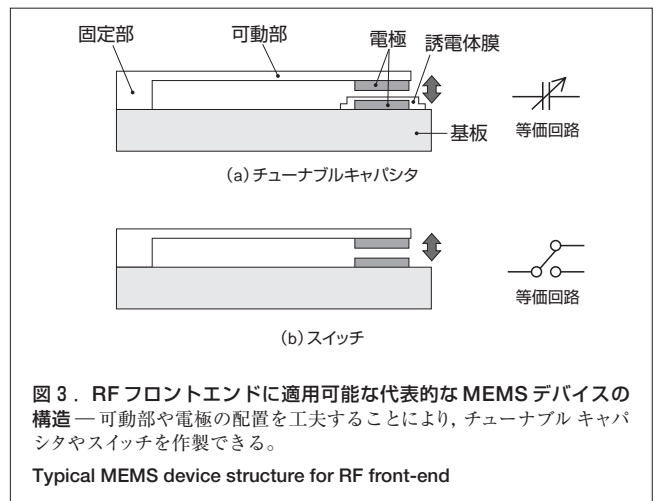


図3に示すチューナブルキャパシタやスイッチは、従来では静電型MEMS構造と呼ばれ、静電力を用いて駆動するものが主として研究・開発されてきた。しかしながら、静電型MEMS構造では駆動のために、通常で30~50V、低いものでも10V以上の動作電圧を必要としており、約3V台のバッテリーが主流である携帯端末機器への応用は困難である。

圧電型MEMSデバイスは、これらの問題を解決する有望

な技術である。駆動力として高い電圧が不可欠な静電気力の代わりに、圧電薄膜の持つ圧電性に基づく駆動力を用いる。十分な電気機械結合定数(電気を機械的駆動に変換する定数)を持つ高品質の圧電薄膜を形成し、MEMSデバイス構造の設計を最適化すれば、原理的には3V以下での動作が可能となる。この圧電型MEMSデバイスを構成する圧電膜として、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)、酸化亜鉛(ZnO)及び窒化アルミニウム(AIN)などいくつかの材料が検討されている。駆動に十分な圧電特性と、半導体プロセスとの相性の良さ、成膜プロセスの安定性から、東芝はAINを用いたRF-MEMSデバイスの開発を行っている。

### 3.2 ナノテクノロジーによる高配向圧電薄膜技術

圧電型MEMSデバイスの性能を要求される無線システム仕様まで高めるためには、原子の配向制御といったナノテクノロジーを駆使することが鍵となる。駆動力が十分に確保できる圧電型RF-MEMSデバイスを再現性よく作製するためには、圧電薄膜が高い電気機械結合定数を持つことが必要であり、そのためには圧電薄膜の圧電性を限界まで引き出せるよう、AINを極めて高いレベルで配向制御する必要がある。一般に成膜温度を高めることで配向性を高めることができることが知られている。一方、半導体プロセスとの作製プロセス上の互換性を確保するためには、低温でも配向制御が可能な自己組織型で原子レベルでの制御技術が望ましい。当社は電極としてAlを選択し、高真空スパッタ成膜法と非晶質バッファ膜を組み合わせた、独自の配向制御技術を開発した<sup>(3)</sup>。

Al電極及びAIN圧電薄膜の配向構造を図4に、また、今回開発した配向制御の概念を図5に示す。非晶質バッファ膜は基板の持つ配向構造をキャンセルする働きがあり、また、高い表面エネルギーを持つため、Alは成膜の初期段階で2次元方向の成長を始め、もっとも配向しやすい(111)方向への自己配向成長モードへと転換する。この成長モードを促進するため、高真空条件を維持するなど成膜条件を整えることで、(111)方向に極めて配向性の高いAl電極を成膜することができた。この高配向Al電極上に圧電薄膜となるAINを連続成膜することで、図5に示すように、AINも、Alの配向

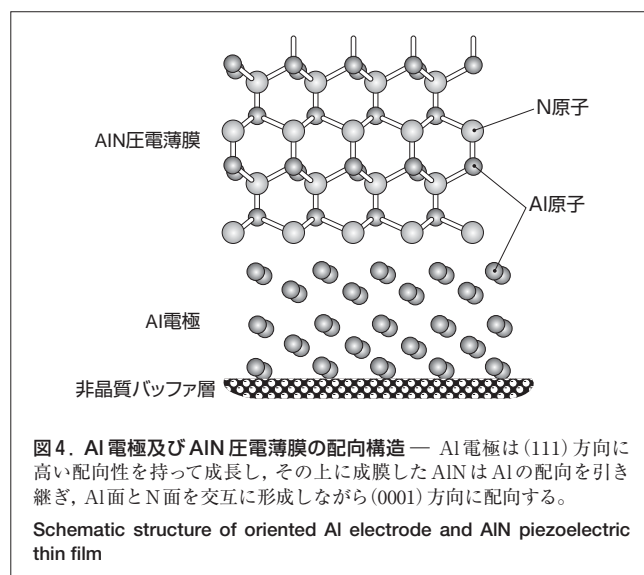


図4. Al電極及びAIN圧電薄膜の配向構造 — Al電極は(111)方向に高い配向性を持って成長し、その上に成膜したAINはAlの配向を引き継ぎ、Al面とN面を交互に形成しながら(0001)方向に配向する。  
Schematic structure of oriented Al electrode and AlN piezoelectric thin film

構造を引き継ぎ、(0001)方向に同様に高配向の膜を得ている。配向性はX線のロックンブカーブの半値幅において、Alが0.6°、AINが0.9°であり、エピタキシャル成長に匹敵する高配向膜を得ることができた。

## 4 チューナブル キャパシタ

次に、この高配向Al電極とAIN圧電薄膜の技術を用いて、アクチュエータ型素子の一つであるチューナブルキャパシタの作製を行った<sup>(4)</sup>。チューナブルキャパシタは、図2において示したように、次世代無線システムにおけるRFフロントエンドの小型化の鍵となるチューナブルアンテナやチューナブル整合回路などにおいて、チューナビリティ(同調性)を得るために必須の素子となる。これまで、半導体素子のバリキャップや静電型MEMS素子への適用が検討されてきたが、前者は電気的な損失が大きという問題があり、後者は前述のように、動作電圧が10V以上と高いことが問題となっていた。圧電型MEMSでは、素子を駆動させるのに圧電力を用いることができるため、低電圧動作が期待できる。

試作したバイモルフ型のチューナブルキャパシタの概略

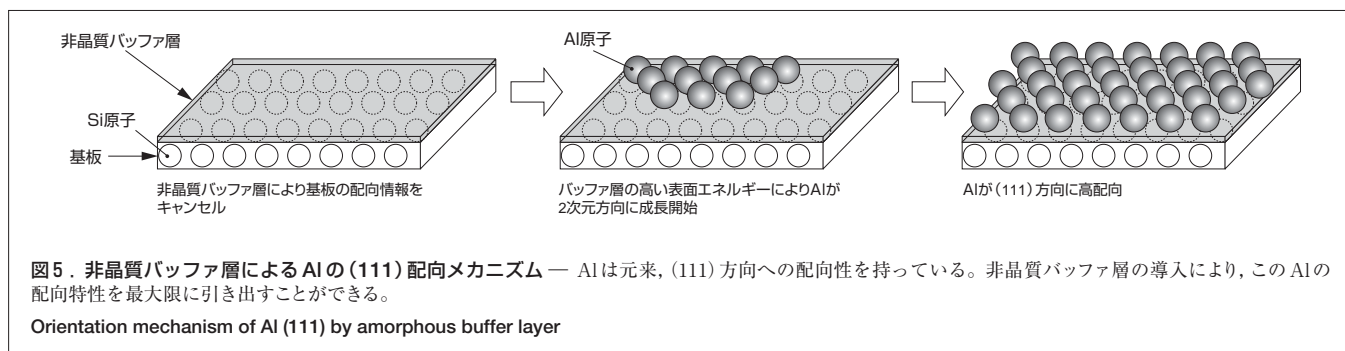
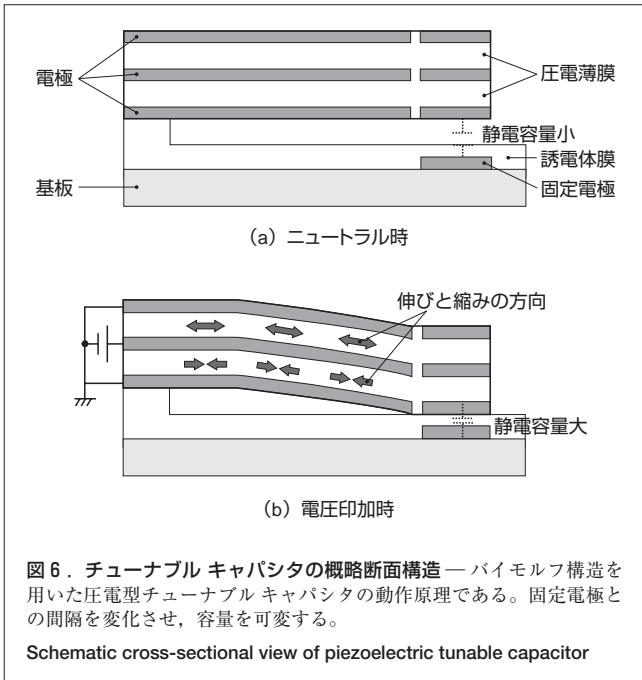


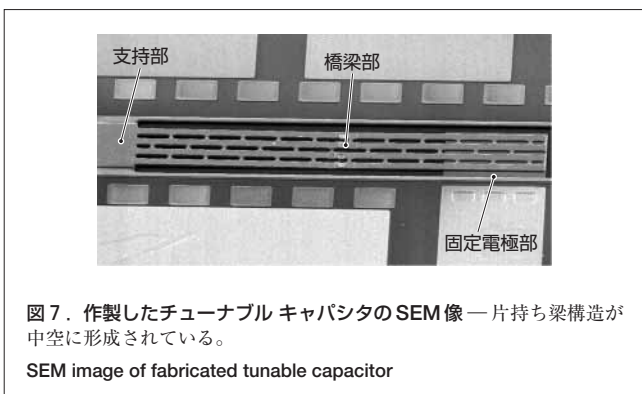
図5. 非晶質バッファ層によるAlの(111)配向メカニズム — Alは元来、(111)方向への配向性を持っている。非晶質バッファ層の導入により、このAlの配向特性を最大限に引き出すことができる。

Orientation mechanism of Al (111) by amorphous buffer layer

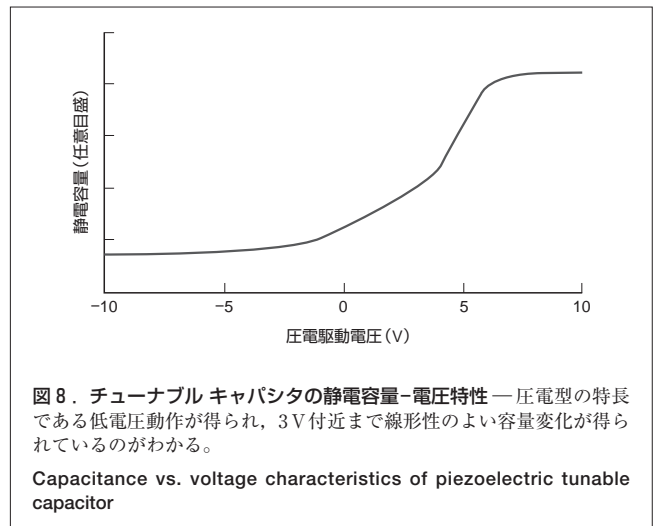


構造を図6に示す。バイモルフ型とは、中央に挟んだ電極の上下で印加する電圧の極性を反転させ、圧電力を増大させる構造である。電圧を印加した場合、圧電力駆動により片持ち梁(ばり)が固定(対向)電極に近づき、容量変化が起きる。

作製したチューナブル キャパシタのSEM(走査型電子顕微鏡)による2次電子線像を図7に示す。片持ち梁構造の橋梁(きょうりょう)が中空に形成されているのがわかる。



バイモルフ型のチューナブル キャパシタの電圧に対する容量変化特性を図8に示す。3V付近まで印加電圧とともに容量が線形性よく変化しており、約3Vの電源電圧を用いる携帯端末において、昇圧回路なしにチューナブル キャパシタが適用できる可能性を示している。この結果は、MEMSを用いたチューナブル キャパシタとしては最小の電圧で動作するものである。



## 5 あとがき

ユビキタス社会の中核を成す無線技術の大きなボトルネックの一つをナノテクノロジーを用いて解決する見通しをつけた。鍵となったのは、圧電薄膜における原子層レベルでの配向制御技術である。これをRF-MEMSに適用することで、無線機器の小型化の鍵となる受動部品であるチューナブルキャパシタを小型でかつ、高性能で作製することに成功した。Al電極を用いるこのプロセスはLSIプロセスとの互換性も高く、この技術により、次世代無線機器の大幅な小型化を可能にする道が開けた。

## 文献

- (1) C. L. Goldsmith, et al. Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches. IEEE Microwave and Guided Wave Letters. **8**, 1988, p.269 - 271.
- (2) R. Ruby, et al. Micromachined Thin Film Bulk Acoustic Resonators. Proceedings IEEE Frequency Control Symposium, Boston, 1994, p.135 - 138.
- (3) Ohara, R., et al. "High-Q Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonator Using Highly (111) Oriented Aluminum Electrode". Proceedings IEEE Ultrasonic Symposium, Rotterdam, 2005. B5-3.
- (4) Kawakubo, T., et al. Piezoelectric RF MEMS Tunable Capacitor with 3V Operation using Post-CMOS Compatible Surface Micromachining Process. IEDM, Washington, 2005, 12. 6.



板谷 和彦 ITAYA Kazuhiko, D. Eng.

研究開発センター 先端電子デバイスラボラトリー主任研究員, 工博。光半導体デバイス材料及びMEMSの研究・開発に従事。応用物理学会, 研究・技術計画学会会員。  
Advanced Electron Devices Laboratory



川久保 隆 KAWAKUBO Takashi D. Eng.

東芝リサーチコンサルティング(株)フェロー, 工博。セラミックス, 強誘電体材料及びMEMSの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Toshiba Research Consulting Corp.