

# RF MEMS可変容量素子

Technologies for RF MEMS Tunable Capacitors

大黒 達也      池橋 民雄      杉崎 吉昭

■ OHGURO Tatsuya      ■ IKEHASHI Tamio      ■ SUGIZAKI Yoshiaki

携帯電話などには、近年、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 以外にワンセグやFM (Frequency Modulation) ラジオ, Suica<sup>(注1)</sup>機能が搭載され、将来は更にBluetooth<sup>®(注2)</sup>, UWB (Ultra Wide Band), WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), WLAN (Wireless LAN) などが追加されると言われている。RF (Radio Frequency) MEMS (Micro Electro Mechanical System) 可変容量素子は、このように複雑化する携帯電話のシステムをスリム化する有望な技術として注目されているが、アクチュエータ部の動作の信頼性やパッケージ技術が確立されておらず、製品化に至っていない。

東芝はこれらの問題を解決するため、世界に先駆けて、アクチュエータ部の安定動作を可能にするインテリジェント駆動方式を採用したドライバICを開発するとともに、量産化に向けて高信頼性と低コスト化を可能にするインライン ウェーハレベルパッケージ (WLP) 技術を開発した。

In recent years, cellular phones have become capable of handling not only wideband code division multiple access (W-CDMA) but also one-segment TV broadcast reception, the Suica card payment system, and FM radio. Furthermore, many functions are being added for better communication such as Bluetooth<sup>®</sup>, ultra-wideband (UWB), worldwide interoperability for microwave access (WiMAX), wireless LAN (WLAN), and so on. In order to balance the increase of components for broadband and miniaturization of terminals, radio-frequency microelectromechanical system (RF-MEMS) variable capacitors have been attracting considerable attention. However, it is necessary to overcome the problems of stiction of the MEMS actuator and the fact that MEMS packaging technology has not yet been fully established.

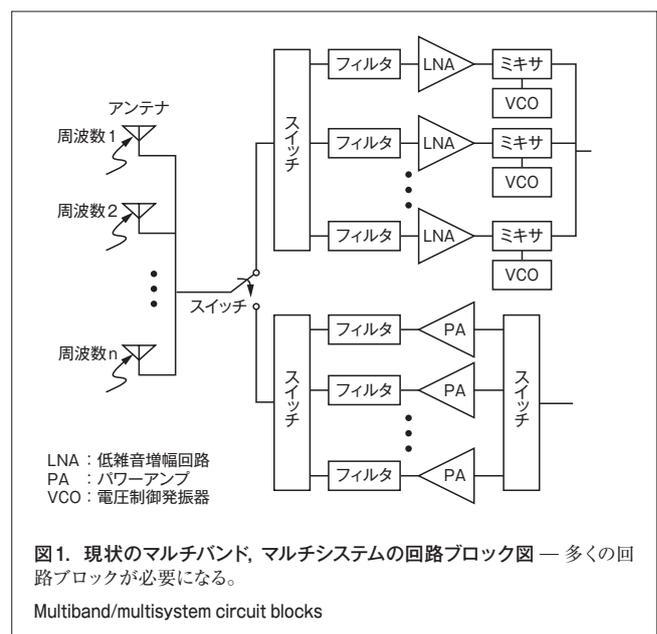
In response to these problems, Toshiba has developed an intelligent driver integrated circuit (IC) realizing stable operation of the MEMS actuator and an in-line wafer level package (WLP) technology with high reliability and low cost.

## 1 まえがき

携帯電話などには、近年 W-CDMA 以外に、ワンセグやFM ラジオ, Suica機能が搭載されており、将来はBluetooth<sup>®</sup>, UWB, WiMAX, WLANなどが追加され、マルチバンド化、マルチシステム化が進むと言われている。使用周波数は70 MHzから5 GHzまでと広範囲にわたり、図1に示すようなシステムすべてを携帯電話の中に入れようとする、回路部品が多くの領域を占めるとともに、周波数ごとにアンテナを用意しなければならない。

一方で、携帯電話は小型・薄型化を常に要求されるため、ハードウェアが占める部分を極力減らす必要がある。そのためにいくつかのシステムを共有化しなければならないが、周波数が異なるため信号の整合が取れず反射などの問題が生じる。これを解決するため、RF (Radio Frequency) MEMS (Micro Electro Mechanical System) 可変容量素子 (以下、MEMS可

変容量素子と略記) を用いて信号の整合を取る試みが進められている。



(注1) Suicaは、東日本旅客鉄道(株)の登録商標。  
(注2) Bluetoothは、その商標権者が所有しており、東芝はライセンスに基づき使用。

今回、東芝は、小型、高信頼性、及び低コストの携帯電話向けMEMS可変容量素子を開発した。ここでは、MEMS可変容量素子の動作原理と特長、及び技術課題とその解決方法について述べる。

## 2 MEMS可変容量素子の動作原理と特長

今回、当社が開発した携帯電話向けのMEMS可変容量素子のSEM(走査型電子顕微鏡)写真と断面図を図2に示す。このデバイスは、中央部に高周波信号が通過する信号線1と信号線2が存在し、その両側のアクチュエータ部分の電極間に電圧を印加すると静電力が発生し引き寄せ合う<sup>(1)</sup>。その結果、信号線1, 2間の距離が変わることで、静電容量値を大きく変化させることが可能になる。

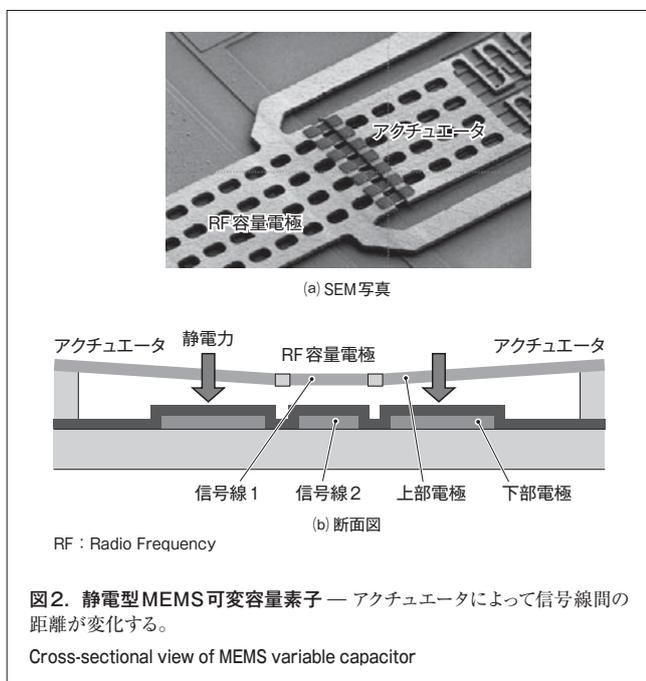


図2. 静電型MEMS可変容量素子 — アクチュエータによって信号線間の距離が変化する。  
Cross-sectional view of MEMS variable capacitor

MEMS可変容量素子の容量-電圧(C-V)特性について、従来のPIN(Positive-Intrinsic-Negative)ダイオードと比較して説明する(図3)。PINダイオードは図3(a)に示すように、シリコン(Si)基板上に形成されたPN接合の間に電気抵抗の大きな空乏層があり、P側に逆バイアス電圧( $V_b$ )を印加すると容量の緩やかな変化が生じる。これに対して、MEMS可変容量素子は図3(b)に示すように、電圧を印加してもすぐに容量値は変化せず、プルイン電圧( $V_{pi}$ )の値に達するとアクチュエータの電極に強い静電力が働き、信号線間隔が狭まり、容量値が急激に増大する。 $V_{pi}$ を超えて更に電圧が増加しても、信号線間は絶縁膜を介して接触しているため間隔が一定となり、容量値はほとんど変化しない。プルイン状態から電圧を下げていくと、 $V_{pi}$ 以下になっても容量値はしばらく減少せず、アクチュ

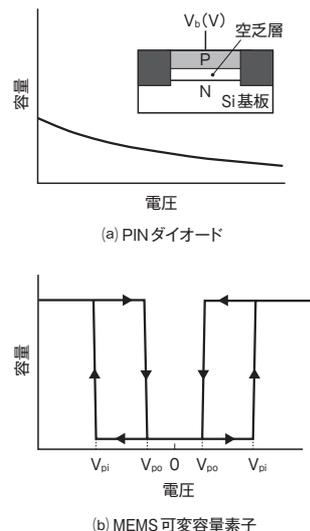


図3. PINダイオードとMEMS可変容量素子のC-V特性の比較 — PINダイオードよりもMEMS可変容量素子のほうが容量変化が大きい。  
C-V characteristics of positive-intrinsic-negative (PIN) diode and MEMS variable capacitor

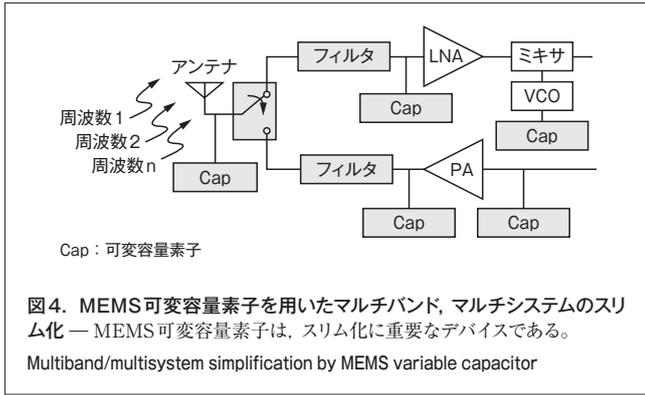
エータ部が離れようとする力が静電力に打ち勝つプルアウト電圧( $V_{po}$ )まで下がると、アクチュエータ部が離れて容量も元の値に戻る。静電力は印加電圧の正負によらないので、C-V特性は図3(b)のように容量値が2値を取る対称型になる。信号部の面積が異なるMEMS可変容量素子を並列に接続すれば、多値の容量を実現できる。

MEMS可変容量素子の特長として、次の3点が挙げられる。

- (1) MEMS可変容量素子の信号線間の距離の変化量はPINダイオードの空乏層幅の変化に比べ大きいので、容量値の可変幅を大きく取れる。
- (2) MEMS可変容量素子は金属膜で形成されているので、Si層で形成されたPINダイオードに比べて寄生抵抗が小さい。
- (3) PINダイオードは印加電圧に対し非線形の変化をするのでひずみ信号が発生するが、MEMS可変容量素子はデジタル可変容量素子なのでひずみ信号が小さい。

## 3 MEMS可変容量素子のアプリケーション

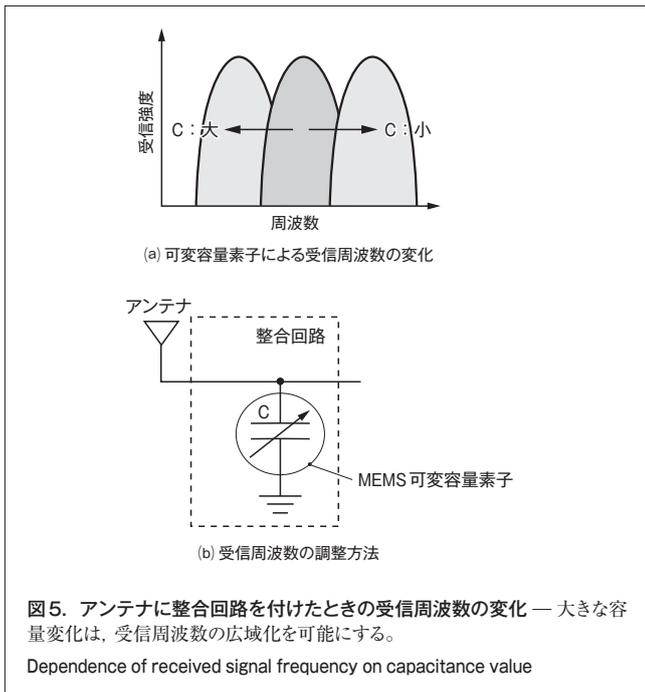
2章で述べた特長を生かし、図1に示すような複雑なシステムをスリム化することを目的として、MEMS可変容量素子を開発している。MEMS可変容量素子を応用してシステムをスリム化する例を図4に示す<sup>(2)</sup>。いくつかの周波数に対して回路ブロックを共有するには、周波数ごとにインピーダンスの整合をとって入力信号の反射を抑制する必要がある。入力信号線とグラウンド間に容量素子を付ける。従来のPINダイオードでは可変幅が小さく複数の周波数に対して整合をとることは難し



いが、容量の可変幅を大きく取れるMEMS可変容量素子の特長を生かして整合調整ができれば、システムの共有化が可能になる。

同様に、アンテナの共有化にも応用できる。一本のアンテナでカバーできる周波数は限られているが、最近の携帯電話などではほとんどが内蔵されてアンテナ長が急激に短くなり、受信できる周波数領域が非常に狭くなっている。そのため、マルチバンド、マルチシステム化時代におけるアンテナの広域化は重要な課題になっている。MEMS可変容量素子を用いたチューナブルアンテナでは、図5に示すように、容量値を大きくすれば低い周波数を、容量値を小さくすれば高い周波数を受信できるうえ、可変幅が大きいことから広帯域化が可能になる。また、アンテナから入力される信号は微弱なため、抵抗成分による信号の減衰は深刻であるが、MEMS可変容量素子は寄生抵抗が小さく性能面でも有利である。

送信部の整合素子として使用する場合、高調波ひずみが



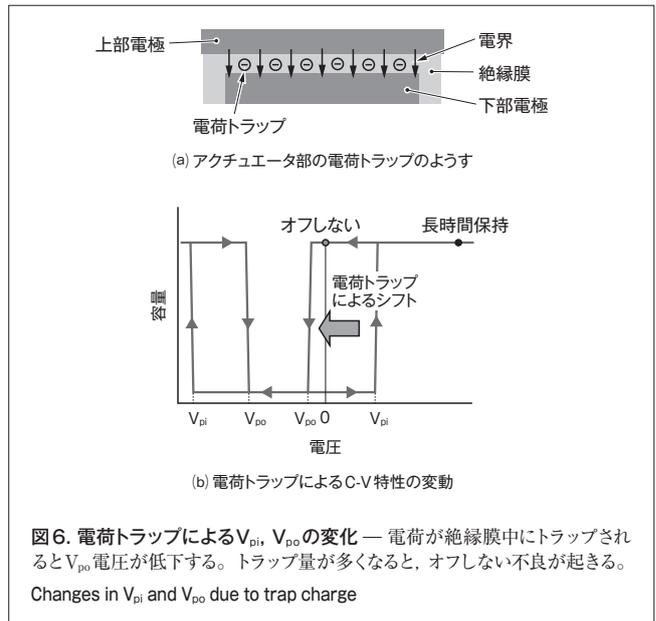
ほかの周波数に対して妨害信号となる可能性があり、非線形特性に注意しなければならない。MEMS可変容量素子はPINダイオードと異なり、3Wの入力でも高調波ひずみが小さいことが実験的に確認されている。

以上のことから、MEMS可変容量素子は、受信部から送信部にわたってシステムのスリム化に有効であると考えられる。

## 4 製品化の課題と解決策

### 4.1 スティックション

MEMS可変容量素子の製品化でもっとも問題になるのは、電荷トラップによるスティクション（固着）である。図3で示したように、MEMS可変容量素子は $V_{pi}$ で急激に上昇する。容量値を固定するために $V_{pi}$ 以上の電圧を長時間アクチュエータ部に印加し続けると、図6に示すように、電極間の絶縁膜中の電荷が急激に増加しトラップされた状態が続く。その後印加電圧を下げていっても、トラップされた電荷の影響でアクチュエータ部がすぐには離れずオフしなくなる。この状態をスティクションと呼び、MEMS可変容量素子の実用化で最大の課題となっていた。



この課題を解決するために、いくつかの案が提案された。例えば、電荷トラップが起きにくい、質の良い絶縁膜の提案である。SiO<sub>2</sub>（二酸化ケイ素）膜は比較的良好と考えられたが、長時間の電圧印加でスティクションを起こすので根本的な解決策にはならなかった。そのほかに有効な方法としては、電荷がトラップされるスピードが印加電圧に大きく依存することを利用して、保持電圧 ( $V_{hold}$ ) を  $V_{pi}$  と  $V_{po}$  の中間値まで落とす案がある。 $V_{hold}$  を下げることで劇的にスティクションを抑制で

きたが、この方法では携帯電話の保証期間にわたって安定して動作させるにはまだ不十分であった。そこで考案されたのがバイポーラ アクチュエーション (BA) と呼ばれ、携帯電話のユーザーが受信周波数を変えたときにアクチュエータへの印加電圧の極性を変える方式である。

印加電圧が正負いずれであっても、図3に示すように容量は同じ値を示すため動作上はまったく問題ないが、スティクション対策の観点からは非常に有効である。その理由は、電荷がトラップされるか否かが電圧の極性に依存しており、正の電圧印加では電荷がトラップされ続けスティクションを起こすが、印加電圧の極性を負にすると捕獲された電荷は逆過程であるデトラップされることを利用して、スティクションを改善することができる点にある。このように、正から負、負から正に交互に印加電圧の極性を変えていく方式は画期的な対策と言えたが、この方式でも完全な解決にはならなかった。それは、電荷がトラップされるスピードがデトラップのときよりも早いことから、正の電圧印加時間と負の電圧印加時間が同じでは、トラップされる電荷が次第に増加し、ついにはスティクションを起こしてしまう。

#### 4.2 インテリジェント駆動方式

当社は、前述のBAをより発展させたインテリジェント バイポーラ アクチュエーション (IBA) を用いることでスティクション問題を解決した<sup>(3)</sup>。従来の方式と異なる点は、印加電圧の極性を交互に変えるのではなく、図7(a)に示すように、ドライバICにより電荷のトラップ量 (Q) をモニタして最適な電圧方向を選択するという点である。モニタは、印加電圧を  $V_{po}$  より低いモニタ電圧 ( $V_{mon}$ ) まで下げて容量値を測定することで行

う。Qが小さければ容量値は小さな値を取り、Qが大きければ容量値も大きな値になることから、 $V_{mon}$ の容量値が小さければ正電圧のまま(図7(b))、大きければ負電圧に反転(図7(c))というように、 $V_{mon}$ の容量値から印加電圧の極性を正負いずれにすべきかを判断する。

今回、 $0.35 \mu\text{m}$ のCMOS(相補型金属酸化膜半導体)プロセスを用いて試作した、IBA機能を持つドライバICのチップ写真を図8に示す。この試作品を用いてMEMS可変容量素子の切替え回数とダイオード検出器でモニタした容量値に対応した電圧 ( $V_{detector}$ ) との関係性を測定した結果を図9に示す。

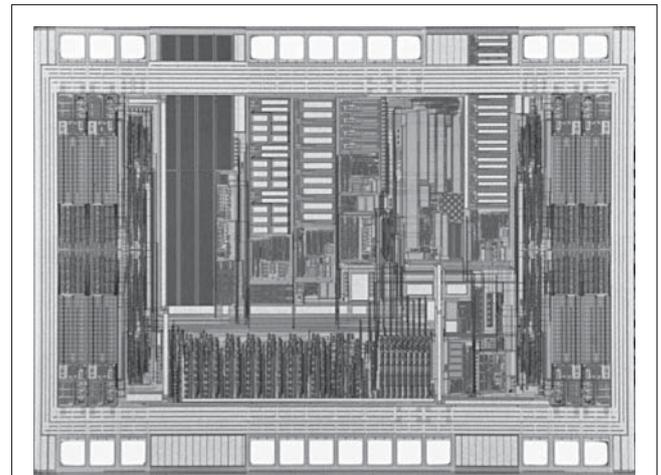
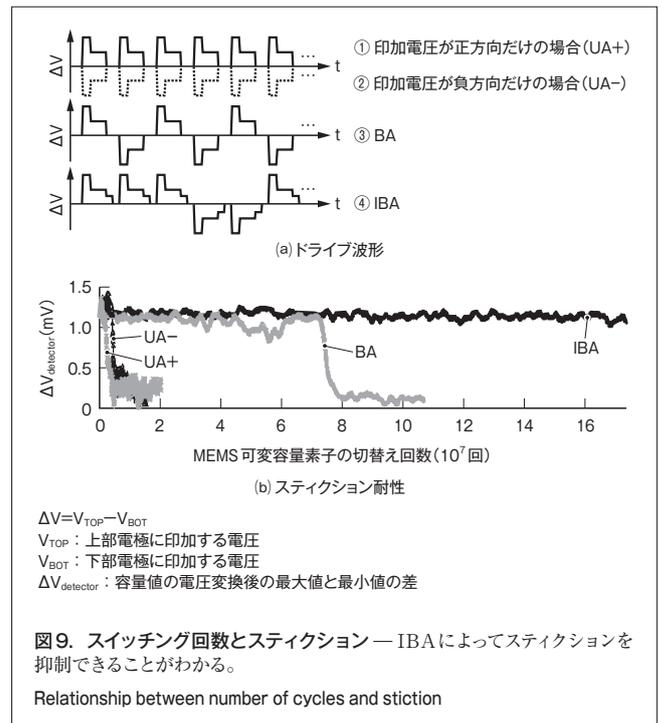
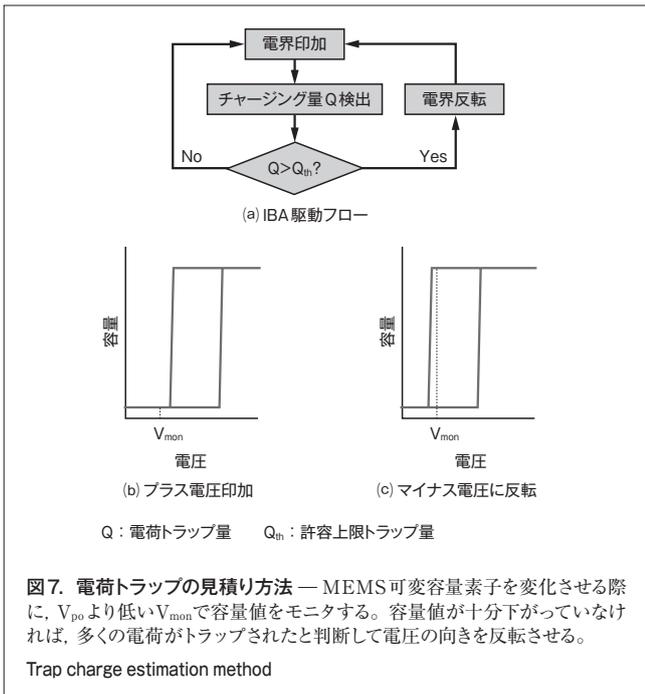


図8. IBA機能を持つドライバICのチップ写真 — インテリジェントなバイポーラ アクチュエーションを実現した。  
Chip photograph of driver IC with intelligent bipolar actuation (IBA)



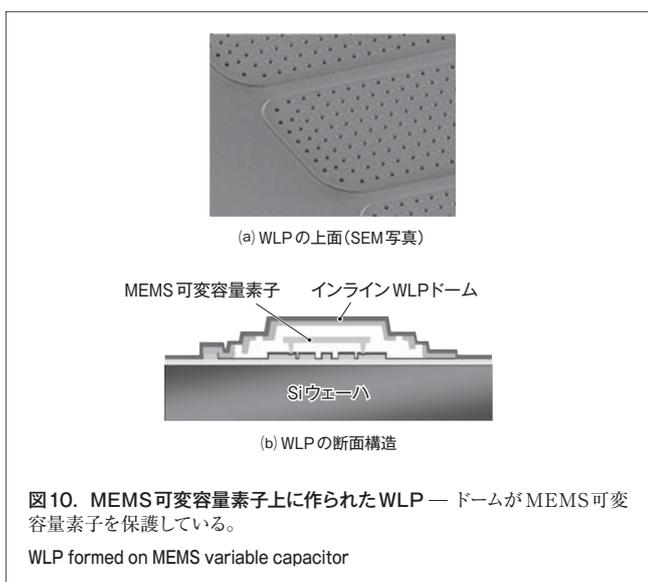
ここで、 $\Delta V_{\text{detector}}$ が急激に減少するのは、スティクションによって容量値が減少したことに対応している。今回の実験では、図9(a)に示すように、印加電圧が常に正の場合(UA+)、印加電圧が常に負の場合(UA-)、BA、及びIBAの4通りの方法を比較した。図9(b)に示すとおり、最初にスティクションを起こしたのはUA+で、これは4.1節で述べたように電荷トラップのスピードが速いことを反映している。BAは、同方向の電圧を印加しているUA+やUA-の場合に比べてスティクション耐性の大幅な向上を示しているが、IBAを用いることで更に耐性が向上することが確認できた。

#### 4.3 パッケージ技術

MEMS可変容量素子の課題の一つとして、パッケージ技術がある。MEMS可変容量素子の可動部分を確保するためには中空パッケージが必要になるが、小型、高信頼性、及び低コストの条件をすべて満たす技術はまだ確立されていない。例えば、MEMS可変容量素子に一つ一つふたをかぶせていくやり方は時間が掛かり、量産には適していない。そこで、当社が開発を進めているのは、インラインWLP (Wafer Level Package) 技術である。これは、MEMS可変容量素子を作成後、生産ラインのクリーンルーム内でパッケージ化まで進めるというものである。この技術の採用でパッケージサイズが格段に小さくなり、低コスト化も実現でき、更に、ダストの少ない環境でMEMS可変容量素子を保護するので歩留まりが向上する。

今回試作したインラインWLPのSEM写真と断面構造を図10に示す。ドーム状の膜がMEMS可変容量素子を保護し、ゴミの侵入を防ぐ。SEM写真で見える穴は、ドーム内にある犠牲層を後工程で除去するために設けられたものである。

今後は、信頼性とともに入産化に向けての検討を引き続き進める。



## 5 あとがき

MEMS可変容量素子は、将来の携帯電話などのマルチバンド、マルチシステム化に向けてシステムのスリム化を図るうえで重要なデバイスと考えられる。

当社が開発した、スティクション対策のためのインテリジェント駆動採用による高信頼性保証や、インラインWLP技術を採用した小型、高信頼性、及び低コストのパッケージ化技術は、従来のMEMS可変容量素子の課題を解決する重要な技術である。

今後は、更に信頼性を高めるとともに、量産化に向けての検討を継続し、早期の製品化を目指していく。

## 文献

- (1) Gabriel M. R. RF MEMS: Theory, Design, and Technology. USA, Wiley-Interscience, 2002, 350p.
- (2) 日経BP. RF MEMS 無線機器の受動部品を排除 仕掛けるIBM, Intel. 日経エレクトロニクス, 834, 11月4日号, 2002, p.116-121.
- (3) Yamazaki, H., et al. An intelligent bipolar actuation method with high stiction immunity for RF MEMS capacitive switch and variable capacitors. Sensor and Actuators A:PHYSICAL, 139, 2007, p.233-236.



大黒 達也 OHGURO Tatsuya

セミコンダクター社 半導体研究開発センター 高性能CMOSデバイス技術開発部主査。RF回路用素子の研究・開発に従事。IEEE会員。

Center for Semiconductor Research & Development



池橋 民雄 IKEHASHI Tamio, Ph.D.

セミコンダクター社 半導体研究開発センター 高性能CMOSデバイス技術開発部主務、理博。RF-MEMS素子の研究・開発に従事。

Center for Semiconductor Research & Development



杉崎 吉昭 SUGIZAKI Yoshiaki

セミコンダクター社 半導体研究開発センター 先端BEOL技術開発部主査。RF-MEMSパッケージの研究・開発に従事。日本化学会、エレクトロニクス実装学会会員。

Center for Semiconductor Research & Development