実用講座

RF-MEMSデバイスにおける接合技術*

中村 陽 登**

Bonding technology on RF-MEMS*

by NAKAMURA Kiyoto**

キーワード RF-MEMS, 接合, 高周波, スイッチ, パッケージ

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を応用したデバイスは、研究室レベルの試作から実際の製品開発のフェーズに移行し始めている。最初に MEMS として市場的な成功を収めた製品はインクジェット用のプリンタヘッドであるが、ハードディスクやゲームコントローラ向けの加速度センサ^①、DLP (Digital Light Processing)^②に代表される表示デバイス、バイオ分析向けのデバイス^③、携帯電話向けの超小型マイク^④、水晶発振子に換わる Si 共振器^⑤など多くの分野において、既存の技術では実現できなかった小型高性能化を実現し、製品の高付加価値化に寄与している。MEMS デバイスの出荷予想は、図 1 に示す様に、新たなデバイス開発を伴い年々増加する予想が立てられている。

MEMS デバイスは半導体プロセスを用いて作成される 3 次元構造を特徴としている。3 次元構造を実現するには、Si などの基板をドライエッチングや湿式のエッチングで加工したり、薄膜を積層しそれを加工するなどの方

法がとられたりする。しかし、一番 MEMS デバイスで特徴的なプロセスは、基板接合を用いて 3 次元構造を実現するプロセスであろう。

MEMS デバイスでは基板接合の技術により、様々な機能を集積化することが可能となったり、デバイスを保護するパッケージを簡便に形成できたりすることにより機能コンポーネントを実現することができる。近年は MEMS で用いられていた接合技術が LSI などの集積化技術へも波及し、高速性を損なわない高密度な集積方法として研究が積極的に行われている^⑥。

今回、特に RF-MEMS デバイスを中心に、どのような接合技術が使われているか、また今後どのような接合技術が求められるかについて考察を行う。

2. RF-MEMS デバイスと接合技術について

2-1 RF-MEMS デバイスとは

RF-MEMS デバイスとは、特に RF 信号を扱うことができる MEMS デバイスのことで、MEMS の部分のみではトランジスタのように自ら発振したり増幅したりという機能は有していない。しかし RF-MEMS 同士の組み合わせや、他の電子デバイスとの組み合わせにより様々な機能を高性能で実現することが可能となる。RF-MEMS の適応例として携帯電話の RF 部を考えると、図 2 に示す様に主要なコンポーネントの多くが RF-MEMS に置き換えられることが予想されている^⑦。このような置き換えにより、携帯電話の通話時間は伸び、さらに早いレートでのデータ伝送が可能になる。

RF-MEMS は次に挙げる 3 つの特徴をそれぞれ組み合わせることにより、同じ機能を平面基板上に作成した (プレーナ構造) 場合よりも良い特性を実現することができる。

i) 立体構造で基板の影響を低減する

身近な LSI や高周波を扱う集積回路である MMIC

図1 MEMSの分野別売り上げ予想
(Yole Development 資料による)

*原稿受付 平成 19 年 9 月 6 日

** 株式会社 アドバンテスト研究所 Advantest Laboratories LTD.

図2 RF-MEMSに置き換わる携帯電話の部品
(点線はMEMSデバイスへの置き換えが進むと予想される箇所)

(Monolithic Microwave IC) はプレーナ構造を取ることでよりデバイス集積化を実現している。しかし、特に高周波を扱う部品において、平面上に形成することで性能が低下する物があり、集積化による小型化と高周波性能はトレードオフの関係となっていた。

ここで例として簡単なコイルを考える。平面状に作られた高周波用のコイルは基板上の配線で形成される所謂スパイラルインダクタと呼ばれるものが一般的である。このように形成されたプレーナ型のコイルでは、基板とコイルが接するために性能指数が低下することが知られている⁹⁾。この性能指数の低下は、発振回路やフィルター回路の性能に大きな影響をあたえる。このコイルをMEMSプロセスにより基板より浮かせた立体構造にすると、基板の影響が排除され性能指数の向上が実現できる⁹⁾。しかし性能向上の反面、立体部をどのように守るかという新たな問題が発生する。

BAW (Bulk Acoustic Wave) フィルターは圧電膜の垂直方向に伝達する弾性波を使うデバイスである。効率良く動作させるため、図3の様にデバイス直下の基板を取り去る構造を実現する必要がある¹⁰⁾。このようにして完成されたフィルターは、3Gの携帯電話などで使われている。

ii) 小さなアクチュエータで電極を動かす

MEMSではアクチュエータの劇的な小型化が可能で、それによりリレーや可変容量などアクチュエータの寸法で大きさが律則されていたデバイスの小型化が可能となった。

特にスイッチの小型化はRF-MEMSデバイスの開発初期よりされてきた¹¹⁾。その結果、静電、電磁および熱のアクチュエータによるRF-MEMSスイッチの製品化が現在なされるに至っている¹²⁻¹⁵⁾。これらのスイッチに用いられ

図3 BAWフィルターの構造

るアクチュエータは数百 μm 角程度の大きさで集積化が容易なため、スイッチ自体の小型化および広帯域化が実現されている。またスイッチ以外に、MEMSによる小型アクチュエータは可変容量への応用例も多数報告されており¹⁶⁾、電子デバイスで実現した可変容量を凌ぐ性能を実現している。

iii) 共振させる

梁や円盤構造などを振動させると、固有の共振周波数で共振することが知られている。その共振周波数は、モードなどにより幾つか存在するが、非常に鋭い共振特性を持つ。共振周波数は、構造体が小さくなればなるほど高くなり、 μm オーダの非常に小さな共振器によりGHz帯の共振が可能となっている。このようにして作成された共振器は、コイルや容量を使って構成された共振器よりも鋭い共振特性を実現することができる¹⁷⁾。またSiデバイスと集積化することも可能であるため、従来の水晶振動子の置き換えも検討されている。安定した共振特性を十分に引き出すためには、汚染や空気によるダンピングの影響を取り除く必要があり、共振器を真空中に置かなくてはならない。RF-MEMS共振器は実用化されているものが幾つかあり、どれもウエハレベルでのパッケージを工程に取り入れている¹⁸⁾。

2-2 RF-MEMS プロセスと接合技術の例

ここで例としてRF-MEMSリレーを取り上げ、実際にどのような接合方法が使用されているかを見たいと思う。

まずRF-MEMSリレーでは、接点の高信頼性を確保するために封止構造を取ることが必須である。そのため、清浄なパッケージプロセスを如何に実現するかがプロセスのキーとなる。

i) omronのRF-MEMSスイッチ¹²⁾

omronのRF-MEMSスイッチは、図4に示す様な3つの部品からできており、固定電極に24Vを印加すると、Siのアクチュエータが静電的に引き寄せられ接点がonになる仕組みとなっている。プロセスの概略は図5に示す通りで、可動部であるSiと配線を施したガラスを陽極接合によりウエハレベルで接合している。陽極接合を用いているのは、固定接点と可動接点の距離を高精度でコントロールするためである。ここでは省かれているが、最後の工程後で蓋となるガラス基板はガラスフリットを用いたウエハに接合しパッケージ構造を完成させている。

ii) 松下電工とアドバンテストのRF-MEMSスイッチ^{13, 14)}

図4 omronのMMR構造

図5 omron MMRのプロセス概略

図6 松下電工のRF-MEMSスイッチ

図7 アドバンテストのRF-MEMSスイッチ

図8 RF-MEMSスイッチのプロセス
(アドバンテストの例)

図9 teravicta のRF-MEMSスイッチプロセス

図10 teravicta のアクチュエータ

松下電工のスイッチは図6に示す様な外観で¹³⁾、内蔵したコイルにより電磁的に可動部分を動かし on/off を行う。アドバンテストのスイッチは、図7に示す様な外観で、バイモルフアクチュエータを採用しており¹⁴⁾、図8に断面図を示す様にアクチュエータに内蔵したヒータへの給電でアクチュエータを動かしている。双方のアクチュエータ形状は異なるが、2回の陽極接合を用いたウエハレベルパッケージのプロセスはほぼ同じである。

ここでも陽極接合を使うのは、omron の場合と同様の理由による。

iii) teravicta の RF-MEMS スイッチ¹⁵⁾

これまで示した RF-MEMS スイッチは、アクチュエータを Si 基板上に形成し、配線を別なガラス基板に形成しお互いを接合することでスイッチを完成させるプロセス

であった。teravicta のプロセスはこれ等と異なり、図9に示すように配線基板上に薄膜を積み上げて行くことで図10の様なアクチュエータを完成させる。また基板にセラミックを使っているため、完成したデバイス一つ一つをコパールのカバーで覆うプロセスを採用している¹⁹⁾ (カバーの取り付けはチップ化前と考えられる)。

3. RF-MEMS における理想的な接合技術

3-1 MEMS に用いられる接合技術

MEMS プロセスで用いられる接合技術を表1に示す。SOI 基板の製造で使うフュージョンボンディングから、プラズマアシストの常温接合まで広い温度範囲の接合方法が MEMS プロセスでは用いられている。また、あまり

温度がかからないデバイスなどでは、エポキシ系フォトレジストである SU-8 や低誘電率膜の BCB (Benzocyclobutene) などが接合に使われることもある。

次に、表に示した接合方法を実際に選択する場合の指標について考察する。MEMS プロセスで接合技術を選択するとき、以下の5つの指標について検討を行い使用する接合方法を決定すると考えられる。

i) 接合温度

一番先に検討されるのは、接合で許容される温度についてであろう。材料の軟化点、共晶点および熱膨張係数を考慮するのは基本であるが、デバイス全体が熱歪で受ける影響に関しても考慮する必要がある。

ii) プロセスへの適合性と実現される高さ公差

使いたい接合方法がデバイスプロセスの中に上手く組み込めるかはプロセス設計において重要である。また MEMS の場合、ある設計された高さの空隙を接合により形成する場合が多い。そのため、どのような公差で空隙が実現できるかの検討が重要となってくる。このため、接着剤やはんだを使った接合方法は精密な高さコントロールが必要なデバイスの場合用いることができないことが多い。

iii) ダメージや汚染

プラズマアシスト接合など、接合直前に接合面を活性化させるために完成したデバイスにプラズマ照射を行わなければならない接合方法がある。このような場合、デバイスに対するプラズマ照射の影響をきちんと把握しておく必要がある。また、加熱などにより接合中に材料から脱ガスや含有材料の析出が発生する場合がある。このような汚染源によりデバイスにダメージを与える場合があるので注意が必要である。

iv) 再加熱への耐熱性

RF-MEMS の場合、完成したデバイスはプリント基板などへ実装される。そのためリフロー工程に何度か通す必要が生じる。リフロー温度は、鉛フリーハンダによる実装の場合 260℃ 程度と考えられる。また、プリント基板の両面を使った実装が一般的であるので、RF-MEMS は2回程度のリフロー工程を通過することが考えられる。そのため、デバイス内部の熱歪について検討するのみならず、接合面の耐熱性についても考慮する必要がある。

3-2 理想の接合方法についての考察

様々な接合方法とそれを選択する時の基本的な観点について述べた。では RF-MEMS のプロセスにおいて理想的な接合方法とはどのような物であろうか。理想的な接合で具備する条件は、先ほど示した接合方法を選択する場合の指標から考えると、以下の5つと考えられる。

- i) 接合の時かかる温度が 300℃ 以下
- ii) ある程度の接合面の粗さが許容される
- iii) 脱ガスがない
- iv) デバイスにダメージを与えない
- v) 300℃ 程度の再加熱に十分耐える

次に、この5つの条件について表1に挙げた接合方法との比較を交えて考察してみたいと思う。

i) 接合の時かかる温度が 300℃ 以下

この温度は、Au など良く用いられるなどの金属間で合

金を作る温度よりも低く、かつプロセスで印加される温度と同程度か低い温度である。また接合温度が高い場合は、Si と pylex ガラス²⁷⁾の様に熱膨張係数を合わせる必要があるが、この程度の温度であれば熱膨張差により制限されていた材料選定の幅を広げることが可能となる。

ii) ある程度の接合面の粗さが許容される

陽極接合やプラズマアシスト接合は、陽極接合は pylex の種類によって 300℃ 以下で、プラズマアシストは条件によって加熱することなく接合が可能である。しかしその接合強度は面粗さに非常に敏感である。特にプラズマアシスト接合において十分な接合強度の確保を実現するためには、数 nm 程度と小さな面荒さの接合面を確保する必要がある。

一般に RF-MEMS プロセスにおいては、接合面への成膜およびエッチングを繰り返し替える事により接合面となるウエハ表面を荒らしてしまう事が多い。また、接合する材料は Si やガラスなど、加圧により凹凸がつぶれるというような効果が期待できない材料を使う事が多い。そのため、接合面粗さの許容範囲拡大が実現すると、プロセス自由度が格段に広がると考えられる。

iii) 脱ガスがない

接合による封止構造をとる場合、脱ガスなど汚染となるような現象が起こると、そのまま除去できない状態となる。そのため、接合中に汚染源となるような脱ガスが無いことが望まれる。

陽極接合は一見清浄に見えるが、接合中に pylex 中の Na や酸素がガラスから析出し汚染源となるという結果も報告されている²⁸⁾。

iv) デバイスにダメージを与えない

ダメージにもいろいろあるが、陽極接合では接合するために数百ボルトの電界を印加するため放電や帯電が懸念され、プラズマアシストによる方法ではデバイスのエッチングやプラズマによる帯電が懸念される。これらのダメージの MEMS 部分に対する影響は、プロセスの工夫で回避できる場合が多くあまり問題にならない。しかし、今後ますます要求が多くなると考えられる LSI との集積化を考えた場合、これらのダメージを低減する事が必要になってくる。

v) 300℃ 程度の再加熱に十分耐える

接合強度が十分なことは第一条件であるが、プリント基板などへの実装を考えた場合に重要なのはむしろ再加熱への耐熱である。実装では Pb フリーはんだによる多面

表1

接合方法	接合温度	適応例
フュージョンボンディング	500～1000℃	[20]
拡散接合	300～700℃	[21]
はんだ接合	250～400℃	[22]
フリットガラス	400℃～	[12]
陽極接合	300～500℃ (+1kV程度の電界印加)	[23]
常温接合	R.T	[24]
プラズマアシスト接合	R.T～400℃	[25]
接着剤	～300℃	[26]

実装が用いられることが一般となり、260℃程度の複数回リフローに耐える必要がある。

接合にはんだや樹脂を使った場合、この温度に耐えられないことが多い。

以上のような具備条件を備えた接合が理想的な接合方法と考えられ、このような接合方法が実現できれば、RF-MEMS 自体の生産容易性のみならず、RF-MEMS の中に Si や化合物半導体デバイスを取り込むことが容易となりさらなる多機能化による新しいファクションの機能モジュールが可能となる。

4. 接点について

これまで半永久的に強固に接合を行う場合の方法について考えてきた。RF-MEMS においてはスイッチなど摺動接点の特性が重要なデバイスが多い。摺動接点では、電気抵抗が十分に下がる程度に接合が起こり、適切な力で接合が乖離する必要がある。接点材料の研究に関しては、電話交換機の高信頼化を実現するため多くの知見が蓄積されてきた経緯がある。しかし、RF-MEMS スイッチで再び接点の問題がクローズアップされてきている。これは、RF-MEMS スイッチで用いているアクチュエータの発生できる力が大きくても数 mN と従来一番小さかったリードリレーの数十分の 1 しかないためである。このような低接触圧下では、新たな材料探索や知見の蓄積が必要となってくる。一番難しいのは、十分に低い接触抵抗を実現し、かつ開閉回数を経ても十分な接点乖離が行われる接点材料の実現と考えられる。

先ほど示した RF-MEMS スイッチの例では、どのスイッチも $0.3 \sim 0.5 \Omega$ が初期抵抗となっており、従来のリードリレーなどと比較して数倍高い抵抗となっている。特に teravicta のスイッチなどは複数の接点を用いてこの抵抗を実現している。それぞれの接点材料についての詳細は公表されていないため不明な部分が多いが、低接触圧で低接触抵抗を実現するため Au 系の合金が使われていると考えられる。これは Au が展性に富む柔らかい金属であるためである。しかしその反面摺動を繰り返すと、ワイヤーボンディングと同様な機構で接点がついてしまい易い傾向にもある。接点では開閉により、磨耗や転移といった現象も発生し、初期状態のみで状態を規定できない難しい面があるが、界面の状態観察など微小加圧化での接合という観点からも様々なアプローチがあることを期待している。

5. ま と め

RF-MEMS と接合技術の関係について述べてきた。RF-MEMS にかぎらず、MEMS 開発者の多くが接合技術のさらなる発展に期待するところが大きい。また、昨今は、LSI の高密度集積化の要請もあり、どんどん MEMS で開発された技術が LSI プロセスに展開されている。これらのことを考えると、接合に求められる条件は非常に厳しくなり、微細な領域での接合の本質的理解を益々進めて行く必要が感じられる。

参考文献

- 1) <http://www.analog.com/jp/index.html> など
- 2) <http://www.tij.co.jp/jrd/dlp/docs/index.htm>
- 3) <http://www.chem-agilent.com/contents.php?id=50>
- 4) <http://www.yamaha.co.jp/news/2007/07030901.html>
- 5) <http://www.sitime.jp/>
- 6) 田中直敬他 “常温で積層チップ間を接続可能な Si 貫通電極技術” RENESAS EDGE 2005 vol.10 pp18-19.
- 7) C.T.C Nguyen "Micromechanical Components for Miniaturized Low Power Communications" Proceedings of the 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium.
- 8) Aoki et.al "Q-factor Definition and Evaluation for Spiral Inductors Fabricated Using Wafer-Level CSP Technology" IEEE trans. Microwave Theory Tech, vol53, No.10, pp 3178-3184.
- 9) Eun-Chul Park et.al "Fully Integrated Low Phase-Noise VCOs With On-Chip MEMS Inductors" IEEE trans. Microwave Theory Tech, vol51, No.1, pp 289-296.
- 10) 大和田邦樹監修 "RF MEMS技術の最前線-ワイヤレス時代のキーテクノロジー-" CMC出版ISBN4-88231-560-2
- 11) G. Rebeiz "RF MEMS THEORY, DESIGN, and TECHNOLOGY" WILEY INTERSCIENCE ISBN 0-471-20169-3
- 12) http://www.omron.co.jp/r_d/mm/mmr.html
- 13) http://www.mew.co.jp/ac/tech/pimites/explan_tech/operation_relay_001/index.jsp
- 14) K. Nakamura et.al "Wafer Level Packaged RF MEMS SPDT Switch with Thermal Driven Bimorph Cantilever" The 6th International Workshop on Microelectronics Assembling and Packaging.
- 15) <http://www.teravicta.com/>
- 16) D. J. Young et.al "A low-noise RF voltage controlled oscillator using on-chip high-Q three dimensional coil inductor and micromachined variable capacitor" Solid-State Sensors and Actuators Workshop June 1998, pp 128-131.
- 17) T. Nguyen et.al "Toward Chip-Scale Atomic Clocks" Digest of Technical Papers. ISSCC. 2005 Vol.1 pp. 84-85.
- 18) <http://www.sitime.com/> <http://www.discera.com/>
- 19) <http://www.suss.com/presentations/asianseminars07/data/12TeraVicta-McKillop.pdf>
- 20) A. A. Ayon et.al "Characterization of silicon wafer bonding for Power MEMS application" Sensors and Actuators A 103(2003), pp1-8.
- 21) H. Q. Li et.al "A HIGH FREQUENCY HIGH FLOW RATE PIEZOELECTRICALLY DRIVEN MEMS MICROPUMP" IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop 2000
- 22) T.J.Harpster "Field-Assisted Bonding of Glass to Si-Au Eutectic Solder for Packaging Applications" IEEE MEMS-03 Kyoto, pp 630-633.
- 23) T. M. H. Lee et.al "An Improved Anodic Bonding Process Using Pulsed Voltage Technique" IEEE Journal of Micromechanical Systems vol.9, No.4, pp 469-473.
- 24) T. Suga et.al "Microassembly System for Integration of MEMS Using the Surface Activate Bonding Method" IEIC transactions on electronics vol.E80-C, No.2, pp 297-302.
- 25) V. Dragoi et.al "Low temperature MEMS manufacturing process: plasma activated bonding" MRS Spring Meeting 2005.
- 26) S. Seok et.al "Packaging methodology for RF device using a BCB membrane transfer technique" J. Micromech Microeng. 16, pp 2384-2388.
- 27) Corning pylex7740 など.
- 28) K. Schjolberg-Henriksen et.al "Sodium Contamination in Integrated MEMS Packaged by Anodic Bonding" IEEE MEMS-03 Kyoto, pp 626-629.