

## 国際会議報告

### 「IEEE MEMS 2014」



東北大学  
大学院工学研究科  
田中 秀治

#### 1. はじめに

「次世代センサ」での国際会議報告は, Vol. 22, No. 1 (2012), Vol. 23, No. 1 (2013)に続き, これで3回目となる。また, Vol. 22, No. 2 (2012)では, 「振動アクチュエータの基礎を復習する」という拙稿も掲載頂いた。この場を借りて, 執筆の機会を与えて下さった次世代センサ協議会の関係者に感謝する。さて, 今回も, 前回, 前々回の国際会議報告と同様に, 2014年1月27~30日に米国・サンフランシスコで開催された IEEE MEMS 2014 から, 著者が選んだいくつかの論文を, その背景とともに報告する形にしたい。前回の「国際会議報告 IEEE MEMS 2013」を読んだから, 本稿を読んで頂けるとより効果的である。

IEEE MEMS は, MEMS 分野で最も重要な国際会議の1つであるが, 今回は908件の投稿から採択された56件の口頭発表, および268件のポスター発表が行われた。論文シェアは米国33%, 日本22%, 中国8%, 台湾7%となっており, 1位と2位は不動であるが, はじめて中国が3位に入ったことが注目される。また, 今年度から産業界枠が設けられ, その枠で数件の論文が採択になった他, 最終日の招待講演者は産業界から選ばれた(後述する)。参加者は700名以上で, 前回(台北)より2~3割, 増えた。

#### 2. ジャイロ

前述の論文シェアからわかるように, 日本のアカデミックにおけるMEMS研究は盛んであるが, 慣性センサの研究はほとんど行われていない。一方, 米国では, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)によるプロジェクトの影響が大きく, 近年, 高性能ジャイロの研究が盛んである。前回の IEEE MEMS 2013 報告では, 新しいジャイロを紹介したが,

その後の進展を報告する。

[1] WHOLE-ANGLE-MODE MICROMACHINED FUSED-SILICA BIRDBATH RESONATOR GYROSCOPE (WA-BRG), J.-K. Woo, J. Y. Cho, Ch. Boyd, K. Najafi, University of Michigan, pp. 20-23

この論文は, DARPA の“MRIG Program”で行われている Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG) を MEMS によって超小形化する研究に関するものである。HRG は, ワイングラス形の石英共振子を用いた航空・宇宙用途のハイエンド・ジャイロであり, Northrop Grumman によって実用化されている。その性能は, ランダムウォークにして単体で  $0.0006^{\circ}/h^{1/2}$ , 4つ組み合わせたシステムで  $0.00006^{\circ}/h^{1/2}$  と民生品のそれと比べて3~4桁, 高い。ただし, 価格は100万米ドルとも言われており, これを MEMS によって画期的に小形化かつ低価格化しようというのが, 本研究の目的である。

今回は, Whole Angle Mode (WAM) で動作するマイクロ HRG が報告された。通常のジャイロは, ドライブ軸を振動させ, それと直交するセンス軸にコリオリ力によって発生する振動を打ち消すようにフィードバック制御し, そのフィードバック信号からコリオリ力, つまり角速度  $\Omega$  を知る Closed-Loop Rate Gyroscope である。このような動作を Force-Rebalance Mode (FRM) と呼ぶ。一方, WAM は, ケース (チップ) に対する振動子の振動方向  $\theta$  が, ジャイロの回転角に比例して回転するフーコー振子の原理を利用する方法であり, この原理によって回転角  $\Theta$  を知るジャイロを Rate-Integrating Gyroscope と呼ぶ。表1に, これら2つの方式の利点と欠点をまとめて比較する。

表1 Force-Rebalance Mode (FRM) と Whole Angle Mode (WAM) との比較

	利点	欠点
FRM	ノイズが小さい。 バイアス安定性を制御しやすい。	スケールファクターが不正確になりがち。 バンド幅とフルスケールに限界あり (ただし, Open-Loop 制御よりは大きい)。
WAM	スケールファクター (Angular Gain) $A_g = \Delta\theta/\Delta\theta$ が構造のみによって決まり, 正確。また, HRG の場合, $A_g$ が大きい。 バンド幅とフルスケールが大きい (制限なし)。	共振子の対称性 (周波数, Q 値=減衰時定数) が悪いと, ドリフトが発生する。 $\theta$ の測定に誤差 (ノイズ) が発生しやすい。

表1 からわかるように, WAM では,  $\Omega$  を積分しなくても直接的に  $\theta$  がわかり, しかも原理的にその精度が高い。したがって, WRM は, ナビゲーション用の高精度ジャイロとして適した方式であると言える。その感度は, 表1 内に定義している  $A_g$  であるが, ワイングラス共振子のアスペクト比が大きいと, リムの (面内方向変位/縦方向変位) が大きくなり,  $A_g$  が大きくなる。したがって, 図1 に示すような3次元形状のワイングラス共振子は感度の点でも有利である。ただし, 共振子の対称性が悪いと, ドライブモードとセンスモードが異なる共振周波数と減衰定数を持ち, 結果としてドリフトが発生する。今回, 理論値に近い大きな  $A_g = 0.27$  が  $100 \sim 700$  °/s の角速度入力全域にわたって安定的に得られたと報告されている。

加速度センサ, ジャイロ, および地磁気センサ (電子コンパス) を各3軸, 合計9軸のセンサをワンパッケージにしたものはコンボセンサと呼ばれ, スマートフォンなどに多用されている。コンボセンサは, 年々, 小さくなり, 既に  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  程度の大きさに達している。System in Package (SIP) の手法のみによって, さらに小さくすることは難しくなっており, 上記の複数種のセンサをウェハレベルで集積化する研究が, 近年, 盛んに行われている。IEEE MEMS 2014 では, そのような研究に関する論文として, D. Senkal *et al.*, pp. 24-27, D. E. Serrano *et al.*, pp. 28-31, M. Li *et al.*, pp. 80-83, Y. Deimerly *et al.*, pp.

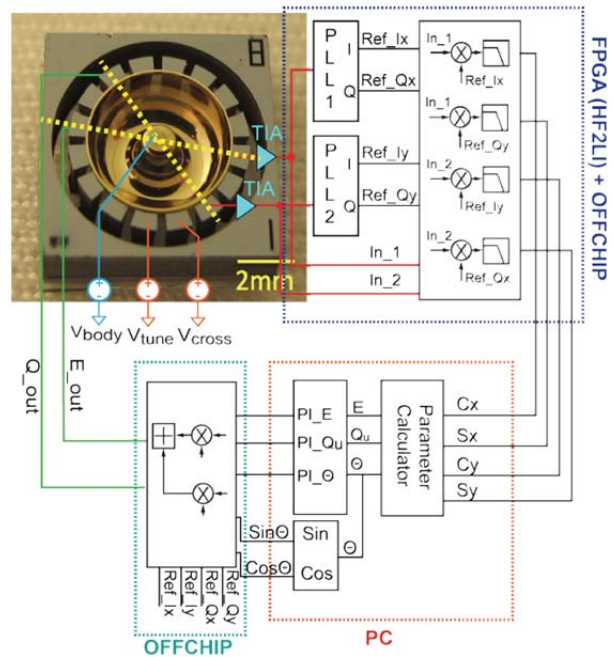


図1 マイクロHRGとWAM動作のための実験セットアップの構成 (文献[1]から転載)

725-728, F. Goericke *et al.*, pp. 729-732 などがある。

[2] 100K Q-FACTOR TOROIDAL RING GYROSCOPE IMPLEMENTED IN WAFER-LEVEL EPITAXIAL SILICON ENCAPSULATION PROCESS, D. Senkal<sup>1</sup>, S. Askari<sup>1</sup>, M. J. Ahamed<sup>1</sup>, E. J. Ng<sup>2</sup>, V. Hong<sup>2</sup>, Y. Yang<sup>2</sup>, C. H. Ahn<sup>2</sup>, T. W. Kenny<sup>2</sup>, A. M. Shkel<sup>1</sup>, <sup>1</sup>University of California, Irvine, <sup>2</sup>Stanford University, pp. 24-47

この論文は, Epi-Seal されたリング形ジャイロに関するものである。Epi-Seal については, 前回の拙稿でも説明しているが, Robert Bosch と Stanford 大学の Thomas Kenny 教授とによる MEMS のウェハレベル・パッケージング技術である。エピタキシャル条件で成膜したエピポリ Si によって封止するため, 気密性と封止空間の清浄性に優れ, 長期安定性が重要な Si クロック発振器 (SiTime) に用いられている。Kenny 教授らは, この技術プラットフォームを様々なセンサ, 具体的には, 圧力センサ, 加速度センサ, ジャイロ, および磁気センサ (後述) に適用する研究を, 最近, 盛んに行っている。その向かう先は, 複数のセンサを同時に作製し, 集積化することであると思われる。

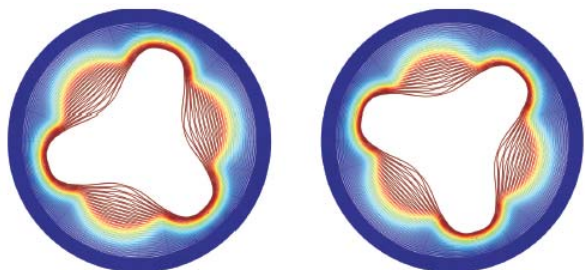
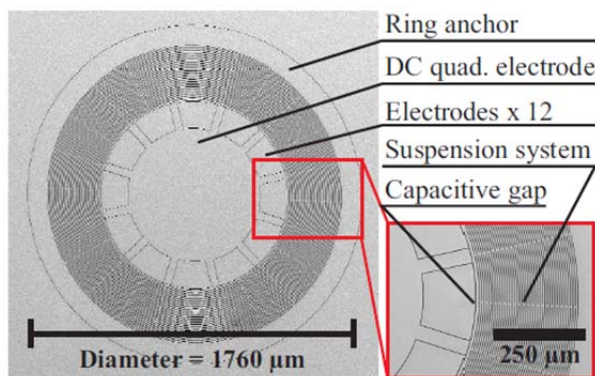
このジャイロは, 44 巻のリングから成り, 図2に

示すようなドライブ／センスモードで共振する。共振周波数は $f=70$  kHz, Q 値は 100000 以上, ドライブ／センスモードの共振周波数乖離は平均で  $\Delta f=21$  Hz であるが, 静電チューニングによって 0.1 Hz 未満に制御されている。FRM で動作させたときの角度ランダムウォークは  $0.047 \text{ } \mu\text{h}$ , バイアス安定  $0.65 \text{ } \mu\text{h}$  であり, そこそこの性能であると言える。

### 3. 磁気センサ

[3] SINGLE-STRUCTURE 3-AXIS LORENTZ FORCE MAGNETOMETER WITH SUB-30 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  RESOLUTION, Mo Li<sup>1</sup>, Eldwin J. Ng<sup>2</sup>, Vu A. Hong<sup>2</sup>, Chae H. Ahn<sup>2</sup>, Yushi Yang<sup>2</sup>, Thomas W. Kenny<sup>2</sup>, David A. Horsley<sup>1</sup>, <sup>1</sup>University of California, <sup>2</sup>Stanford University, pp. 80-83

現在, 電子コンパスとして, ホール素子や磁気抵抗素子が広く用いられている。この研究は, 3 軸磁気センサにも前述の Epi-Seal を提供する技術プラットフォームを適用してみせたものである。既に, 同技術プラットフォームによって, 加速度センサ, ジャイロ, および圧力センサが作製されているので,



Vibration amplitude (nm) for 200 nm peak displacement

図 2 Epi-Seal されたリング形ジャイロ (上) とその共振モード (下) (文献[2]から転載)

磁気センサが揃えば, 次世代の 10 軸コンボセンサ (6 軸慣性センサ+3 軸地磁気センサ+気圧センサ) を構成する全ての要素が同一の技術プラットフォーム (たとえば, STMicroelectronics の THELMA プロセス) で作製できることになる。

磁気を検出原理は, 共振子にその共振周波数と等しい周波数の AC 電流を流し, ローレンツ力で共振子を共振させ, その振幅を静電容量変化として検出するというものである。図 3 に構造と動作原理を示すが, H型の共振子内の電流経路を3通りに変えて, 直交する3方向の磁界に対応する3つの異なるモードで共振を起こし, 1つの共振子で3軸の磁界を測定できる。上記3つのモードの共振周波数が約 47 kHz で等しくなるように構造設計されており, 1つの電流源を3軸で共用できる。電流で規格化したときの感度は, これまでに報告された短軸ローレンツ力磁気センサのそれと同等である。

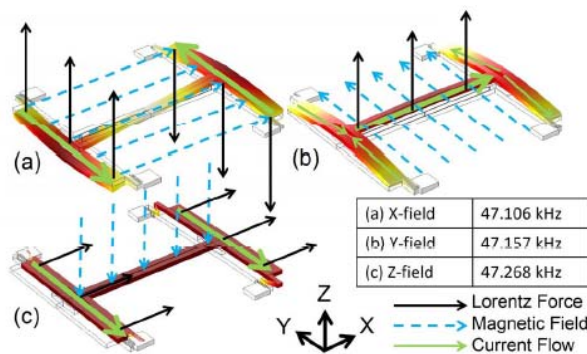
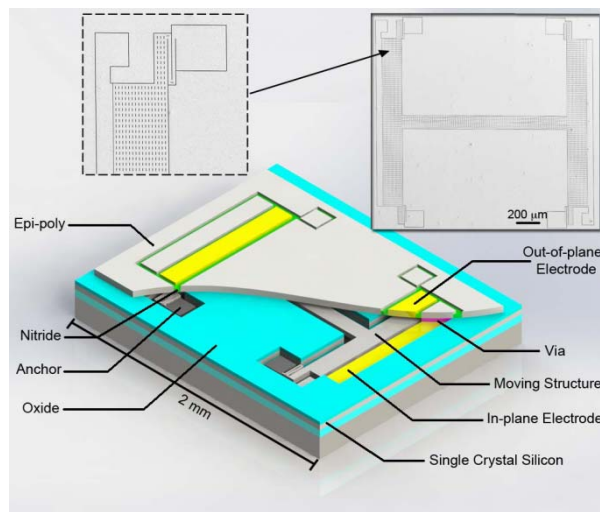


図 3 Epi-Seal された磁気センサの構造 (上) とその共振モード (下) (文献[3]から転載)

#### 4. 触覚センサ

[4] A TECHNOLOGY FOR MONOLITHIC MEMS-CMOS INTEGRATION AND ITS APPLICATION TO THE REALIZATION OF AN ACTIVE-MATRIX TACTILE SENSOR, Fan ZENG and Man WONG, The Hong Kong University of Science and Technology, pp. 445-448

この論文は、 $16 \times 16$  の集積化触覚センサアレイに関するものである。素子ピッチは約  $17.5 \mu\text{m}$  であり、物体のテクスチャ認識への応用が想定されていると思われる。ピエゾ抵抗式ダイヤモンドと読み出し回路との集積化には、STMicroelectronics の圧力センサに用いられている VENSENS プロセスと同様のプロセスが開発されている。図 4 に示すように、Si ウェハに Deep Reactive Ion Etching (DRIE) によって直径  $1 \mu\text{m}$  以下、深さ数  $\mu\text{m}$  程度の穴を密集してあける。これを  $1150^\circ\text{C}$  で高温アニールすると、Si がリフローし、表面が繋がり、その下に空隙ができる。これによって、Si ウェハに埋め込まれたダイヤモンドが形成される。その後、標準的なプロセスによって読み出し回路を形成する。

このプロセスには、次のような利点がある。1) ウェハ接合を必要とせず、しかもプロセスはウェハの片面のみに行われる。したがって、CMOS ラインでも製造しやすい。2) センサがウェハ 1 枚で構成され、薄い。3) 過大な力/圧力がかかっても、ダイヤモンドが底付きして壊れない。これらの利点は、STMicroelectronics の圧力センサにそのまま当てはまる。

Robert Bosch は、同様の利点を有する圧力センサを異なるプロセスで製造している (S. Armbruster *et al.*, Transducers '03, pp. 246-249)。Si ウェハに p/n 型ドーピングと窒化膜によるマスキングを施した後、フッ酸中で陽極化成することによって、ポーラス Si を形成する。このとき、表面の p+層を低電流密度で空孔率 45%程度にポーラス化し、続いて電流密度を増やし、バルク p-Si を空孔率 70%程度にポーラス化する。これを水素中  $900 \sim 1100^\circ\text{C}$  でアニールすると、表面が繋がり、その下に空隙ができる。その後、Si をエピタキシャル成長させると、望みの厚さの埋め込み Si ダイヤフラムが形成される。

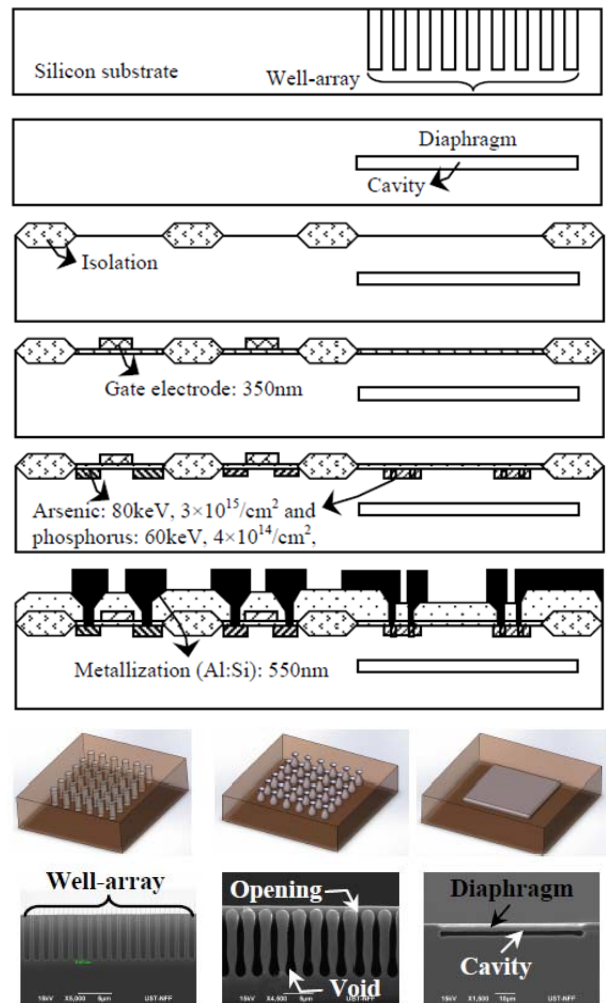


図 4 集積化触覚センサの作製プロセス (上) と Si 埋め込みダイヤモンド (下) (文献[4]から転載、一部改変)

[5] AN SOI TACTILE SENSOR WITH A QUAD SEESAW ELECTRODE FOR 3-AXIS COMPLETE DIFFERENTIAL DETECTION, Y. Hata<sup>1</sup>, Y. Nonomura<sup>1</sup>, H. Funabashi<sup>1</sup>, T. Akashi<sup>1</sup>, M. Fujiyoshi<sup>1</sup>, Y. Omura<sup>1</sup>, T. Nakayama<sup>2</sup>, U. Yamaguchi<sup>2</sup>, H. Yamada<sup>2</sup>, S. Tanaka<sup>3</sup>, H. Fukushi<sup>3</sup>, M. Muroyama<sup>3</sup>, M. Makhata<sup>3</sup>, and M. Esashi<sup>3</sup>, <sup>1</sup>Toyota Central R&D Labs., <sup>2</sup>Toyota Motor Corp., <sup>3</sup>Tohoku University, pp. 709-712

これは、豊田中央研究所、トヨタ自動車、および我々の共著によるロボット用触覚センサに関する論文である。我々は、ロボットの全身に多数の触覚センサで覆うために、共通バス上に配置する超小形触覚センサを開発している。各触覚センサが CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision

Detection) 方式でデジタル通信するが、信号処理と通信機能は我々が開発したASIC (Application Specific Integrated Circuit) によって実現され、このASICとMEMS力センサとがウェハ接合によって集積化されている (M. Makihata *et al.*, Transducers 2013, pp. 2729-2732)。

本論文は、上記MEMS力センサ部分に関する新しい報告であるが、これまでのものと比較して、3軸化され、しかも各軸が差動容量検出となっている。3軸の差動化は、図5に示す「シーソー電極」によって実現されている。中央の受圧部の周りに4つ配置されているシーソー電極は、ねじりばねによって支えられ、力の方向によって異なる組み合わせで傾斜(回転)する。差動化することによって、出力のドリフトを抑えることができる。なお、センサチップ

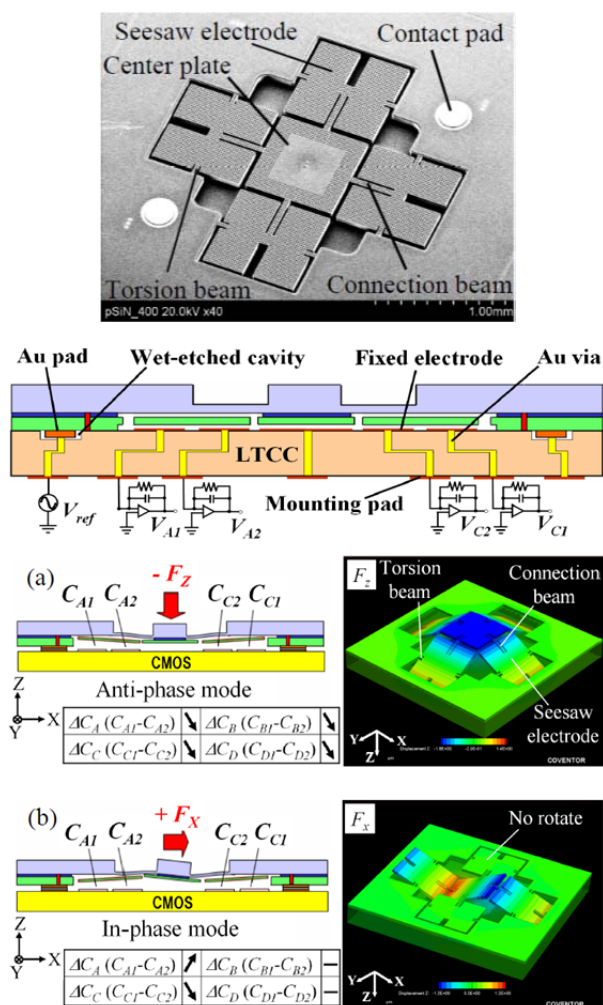


図5 差動容量型3軸触覚センサの構造と差動容量検出の方法 (文献[5]から転載)

の背面に実装用電極パッドを取り出すためには、ニッコーと東北大学とが共同開発した陽極接合できるLTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) ウェハが用いられている。

## 5. クロック共振子

[6] COMMERCIALIZATION OF WORLD'S FIRST PIEZOMEMS RESONATORS FOR HIGH PERFORMANCE TIMING APPLICATIONS, H. Bhugra, S. Lee, W. Pan, M. Pai, D. Lei, Integrated Device Technology, Inc. (IDT), pp. 204-205

最終日のPlenary Talkは産業界からのもので、最近、実用化されたIntegrated Device Technology (IDT社)の圧電MEMSクロック共振子が紹介された。IDT社はCMOSクロック発振器などを販売するメーカーであり、2008年に圧電MEMS共振子の開発を開始し、最近、これがサムソン電気の4Kテレビに採用されたと発表した。

圧電MEMS共振子の構造は、図6(上)に示すようにSi上にAIN薄膜を形成したものであり、Georgia工科大学のFarrokh Ayazi教授らが研究してきたものに基づいている。SiO<sub>2</sub>層、Siへの高濃度ドーピングなどによって、周波数温度安定性は共振子単体で±200ppm程度(-40°C~90°C)に改善されている。この共振器が、図6(下)に示すように薄膜ウェハレ

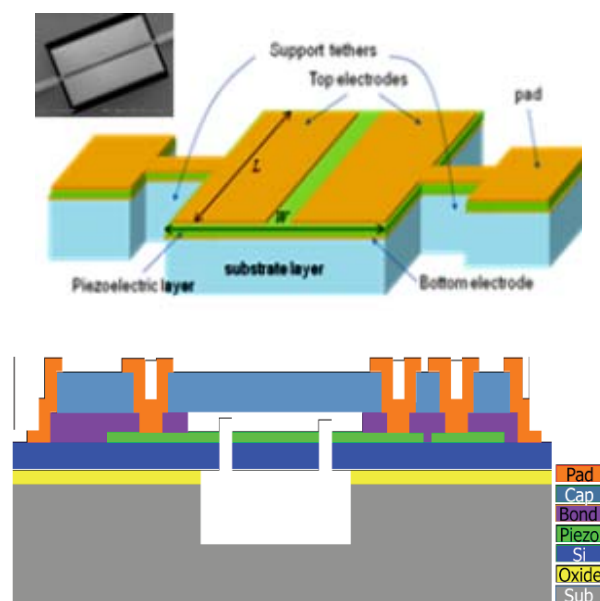


図6 AlN圧電MEMS共振子(上)と薄膜ウェハレベル・パッケージ(下)の構造 (文献[6]から転載)

ベル・パッケージングされている。

位相ノイズは水晶発振器と比較して小さいわけではないが、IDT社の圧電MEMS発振器の特長は、特に熱と機械的ショックに強いこと、および安価であることである。最近、システム内のクロック配信によってクロック発振器の需要自体が減っている上、発振回路、温度補正回路、分周回路などがシステム側に搭載され、クロック発振器に代わって共振子単体が求められるようになっており、タイミングデバイスに対する低コスト化の圧力は強い。したがって、そこそこの性能であっても安価であることは非常に重要である。

IDT社のMEMSクロック発振器の低コスト化の理由は、まず、小さなAIN共振子が薄膜ウェハレベル・パッケージングされ、ダイが $550\mu\text{m} \times 450\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 程度と小さいこと、そして、2次パッケージングに標準的なリードフレーム・パッケージを利用してあることにある。この方法は、水晶共振子を1つ1つセラミックパッケージに収めていく従来の方法と比較して量産効果が大きい。優れたパッケージング技術はMEMSの競争力の源泉である。

## 5. おわりに

今回のIEEE MEMS 2014の報告では、6つの論文を紹介した。著者による国際会議報告を含むMEMS解説のインターネット記事のリンクが、著者の研究室のホームページ (<http://www.mems.mech.tohoku.ac.jp/documents/internet.html>) にまとめてある。インターネット検索エンジンで「mems tohoku」と入力し、我々のホームページにアクセス頂くのが便利である。そこには、本稿で紹介しなかったIEEE MEMS 2014の論文も紹介してあるので、合わせてお読み頂けると幸いである。次回のIEEE MEMSは2015年1月18日からポルトガルのリスボン近くで開催される。アブストラクトの投稿締切は9月9日である。