

国際会議報告

「IEEE MEMS 2012」



東北大学
大学院工学研究科
田中 秀治

1. はじめに：IEEE MEMS の概要

IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE MEMS) は、隔年で開催される Transducers (今回は 2013 年 6 月 16~20 日にスペイン、バルセロナで開催) と並んで MEMS 分野で最も重要な国際会議である。その第 25 回目が、2012 年 1 月 29 日から 2 月 2 日の会期でフランス、パリで開催された。

IEEE MEMS と Transducers は共に MEMS 分野で最高峰の国際会議であるが、性格は異なる。IEEE MEMS は、アカデミックが新しいアイデアとその実証結果を初めて披露する場という性格が強く、発表のほとんどが大学や公的研究機関からである。IEEE MEMS がこのような方向を明示的に標榜しているわけではなく、このような性格付けはその論文査読システムによるところが大きいと思われる。IEEE MEMS の TPC (Technical Program Committee) は、各国で活躍している 30 名程度の若手~中堅研究者で構成され、採択可否を決める TPC 会議では、アイデアの新しさと実験結果の有無(完成度)が最重要視される傾向にある。言い換えると、ある部分の改良、実用化に近い開発などは、その重要性にかかわらず、どうしても採択されにくい傾向にあり、結果的に企業からの発表は少なくなりがちである。このような傾向はよく知られているので、そもそも企業からの投稿が少ないことも大きく影響している。「アイデア勝負」の論文が多いという声も聞かれるものの、このような性格付けは、それはそれでコミュニティに受け入れられていると思う。

さて、今年の IEEE MEMS では、口頭発表 45 件(招待講演含む)、ポスター発表 298 件、合計 343 件の論文が発表された。978 件の投稿に対して採択率は約

35%であり、例年並みである。国別の論文数は、上位から米国 119 件、日本 84 件、台湾 29 件、韓国 21 件と続き、我が国の貢献が大きいこと、およびアジア勢が存在感を増していることがわかる。2010 年の中国、香港における回では、IEEE MEMS の歴史上、初めてパラレルセッションが持たれたが、昨年に引き続き、今年もシングルセッションのみであった。

2. 発表論文の紹介：高周波 MEMS

2. 1 温度補償 MEMS 発振器

A 27 MHZ TEMPERATURE COMPENSATED MEMS OSCILLATOR WITH SUB-PPM INSTABILITY, Roozbeh Tabrizian, Mauricio Pardo and Farrokh Ayazi (Georgia Institute of Technology), pp. 23-26

Si MEMS 共振子を用いたクロック発振器は、最近、実用化された MEMS として知られている。Si クロック発振器の最大の問題点は、Si の周波数温度係数(TCF)が -30 ppm/K 程度と大きいことである。現在、商品化されているものでは、この温度による周波数変動を PLL (phase lock loop) 回路で補償しているが、周波数が非連続にジャンプするので、位相ノイズ・ジッタが増える。このため、Si MEMS 発振器は低位相ノイズが要求される高付加価値用途には使えない。

ほとんどの材料で TCF は負の値になるが、身近な材料である SiO_2 は大きな正の TCF を示す。 SiO_2 のこの性質を用いて温度補償するアイデアは 1960 年代からあり、これを Si MEMS 発振器に適用した例も少なからずある。従来、Si MEMS 共振子に SiO_2 を成膜する方法が取られていたが、Si の優れた機械特性が損なわれ Q 値が下がること、 SiO_2 表面がチャージアップして共振周波数がずれることなどが問題であ

った。

これに対して、Ayazi 先生のアイディアは、単結晶 Si に DRIE (deep reactive ion etching) で深い穴を多数開け、それを SiO₂ で埋め込んで温度補償するというもので (図 1)、Q 値低下とチャージアップの問題の解決を目指したものである。トランスデューサには AlN 圧電膜を用いて、周波数調整に必要な電気機械結合係数 (k^2) を確保し、PLL 回路を用いずに、オンチップキャパシタバンクを切り替えて発振周波数を補正する。その結果、発振周波数 27 MHz で、± 0.35 ppm (−20~+80°C) の周波数安定性が実証されている。位相ノイズは 1 kHz オフセットで−101 dBc/Hz, 1 MHz オフセットで−145 dBc/Hz と比較的良好である。 k^2 が小さく、スプリアスのような共振の Q 値の高さばかり強調する MEMS 共振子の論文が多い中で、性能や実用性の観点からこの論文に注目した。

2. 2 IC 上に作製した PZT 駆動 MEMS スイッチ

LOW-VOLTAGE PZT-ACTUATED MEMS SWITCH MONOLITHICALLY INTEGRATED WITH CMOS CIRCUIT, Matsuo Kousuke, Masaaki Moriyama, Masayoshi Esashi and Shuji Tanaka (Tohoku University), pp. 1153-1156

これは著者らの論文で、IC 上に作製した PZT 駆動 MEMS スイッチ (図 2) を報告している。機械的に接点を ON/OFF する MEMS スイッチは、高周波信号の切り替えに用いられる。これまでに多数の論文が発表されているものの、MEMS スイッチの実用化例は、計測器用途で数える程しかない。代表例は、アドバンテストの IC テスタに用いられているもので

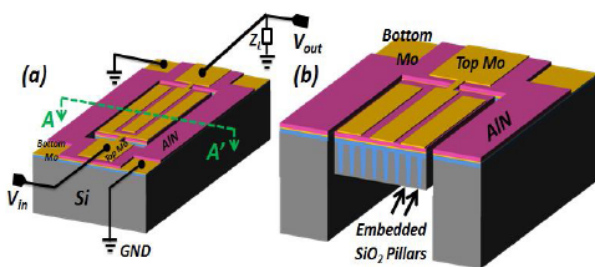


図 1 埋め込み SiO₂ を用いた温度補償 MEMS 共振子の構造 (IEEE MEMS 2012 プロシーディングスから引用)

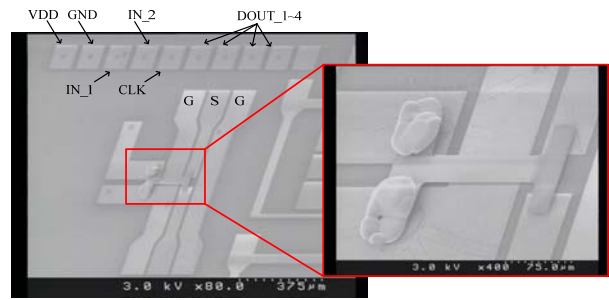


図 2 IC 上に形成した PZT 駆動 MEMS スイッチ

ある (東北大学との共同開発)。今後、無線通信機器の周波数切り替えなどへの応用も期待されているが、このような用途では、MEMS スイッチは IC 上に集積化されていることが望ましい。

これまでも IC 上に作製された MEMS スイッチは報告されているが、静電駆動のものである。アクチュエータの性能を考えると、静電駆動より PZT を用いた圧電駆動の方が小形化できる可能性が高い。限られた面積の IC 上では小さいことが重要であり、その点では PZT 駆動が望ましいが、PZT は成膜に 600°C 程度の高温が必要なので、IC 上に直接堆積できない。この問題を解決するために、PZT 駆動 MEMS スイッチの構造を、一旦、別の Si ウェハに形成し、IC ウェハに樹脂接合によってトランスファーする方法を開発した。PZT 駆動 MEMS スイッチを実際に IC 上に作製した報告は、この論文が初めてだと思われる。

3. 発表論文の紹介 : 光 MEMS

3. 1 エレクトロウェットिंग駆動フレネル・レンチキュラーレンズ

ELCTROWETTING FRESNEL LENTICULAR, Y. Takai, R. Koshiishi, S. Kirita, M. Tsuchiya, Y. Watanabe, K. Takahashi, Y. Imai and Y. Shimpuku (Sony Corporation), pp. 27-30

フレネル・レンチキュラーレンズ、あるいはそれに類するものは、ディスプレイ、立体写真、プロジェクタなどに用いられている。この論文は、そのレンズ形状をエレクトロウェットिंग (EWOD : 電界をかけると疎水性表面が濡れやすくなる現象) によって変化させるデバイスを報告している。EWOD は電子ペーパーなどにも使われている。

図 3 に示すように、対角 6 インチの樹脂フィルム

一面にホットエンボシングで斜面を有する溝を加工し、その斜面に ITO 電極を形成し、パリエンの絶縁膜で覆う。その表面にシリコンオイルと水溶液を広げれば、2 相分離し、溝にはシリコンオイルが入る。ITO 電極に電圧をかければ、斜面に対する濡れ性が変わるので、2 相界面が変形し、レンズの形が変わる。このようなデバイスでは、液体の選択が重要である。2 つの液体の間でレンズ効果を上げるために屈折率差は大きく、向きによらないために密度は等しく、しかも、表面張力が適当で、混ざったり反応したりせず、長期にわたって安定でなくてはならない。

ポスター発表会場では、試作デバイスがダイナミックに動く様子がパソコン上の映像で見られた。発表者によると、フレネル・レンチキュラーレンズが可変になれば、3D テレビの視野角調整、LED 照明の光線調整などに利用できる可能性があるとのことである。

3. 2 立体視用レンズ振動デバイス

A MICRO TRANSLATING LENS UNIT FOR STEREO IMAGING THROUGH SINGLE-IMAGE ENDOSCOPE, Wook Choi, Gennady Sigal, Vladimir Rubtsov and Chang-Jin “CJ” Kim (University of California, Los Angeles and Intelligent Optical Systems), pp. 3-6

初日の会場には、アナグリフ式立体視用の赤青眼

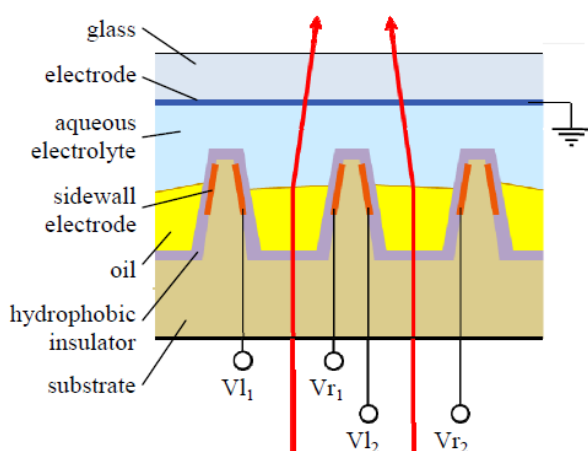


図3 EWOD 駆動フレネル・レンチキュラーレンズの断面構造 (IEEE MEMS 2012 プロシーディングスから引用)

鏡が配布されていた。これはこの論文発表用のもので、立体視用レンズ振動デバイスで取得された画像がスクリーンに映し出され、この眼鏡を用いて出席者全員が立体写真を見るという趣向であった。交差視による立体写真を撮影するには、普通、複眼カメラが用いられるが、カテーテルへの適用を考えたとき、その先端にはレンズを2つ収める空間がない。そこで、小さなレンズを静電櫛歯アクチュエータによって、振幅にして 50 μm 程、200 kHz で振動させ、単眼で立体像を得るデバイスが開発された。

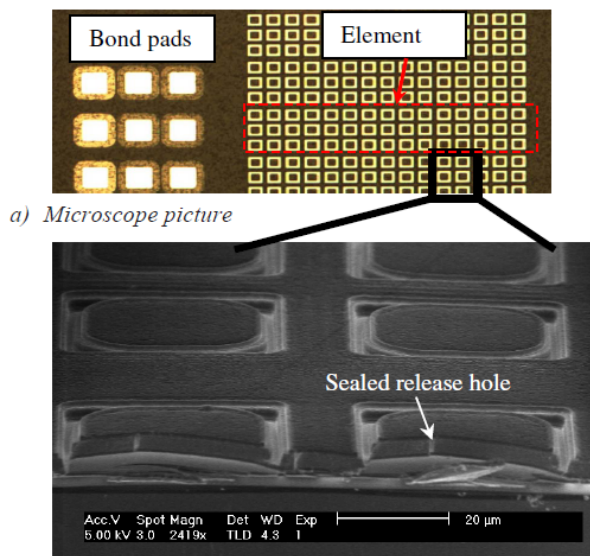
4. 発表論文の紹介：医療・バイオ MEMS

4. 1 Poly-SiGe を用いた CMUT

POLY-SiGe-BASED CMUT ARRAY WITH HIGH ACOUSTICAL PRESSURE, Ph. Helin, P. Czarnecki, A. Verbist, G. Bryce, X. Rottenberg and S. Severi (IMEC), pp. 305-308

超音波画像診断は人間ドックや産婦人科でおなじみである。その際、体表に当てられる装置には超音波トランスデューサが入っている。従来、超音波の送受信には圧電素子が用いられていたが、最近、日立メディコは、静電トランスデューサを用いる CMUT (capacitive micromachined ultrasonic transducer) を実用化した。圧電方式に比べて、単パルスを出しやすく、しかも人体と音響インピーダンスが近いことが、CMUT の主な利点である。CMUT の研究では、Stanford 大学の Khuri-Yakub 先生が有名であるが、Khuri-Yakub 先生の論文発表よりずっと前に、立命館大学の鈴木先生は、当時、在籍していた NEC で同じ原理のデバイスの研究をしていた (Kenichiro Suzuki *et al.*, Transducers '87, pp. 414-417)。

さて、この論文は poly-SiGe で作製した CMUT (図4) を報告している。大規模な 2 次元アレイの超音波トランスデューサは、IC 上に形成される。Poly-SiGe は 450°C 程度の低温で堆積でき、厚く成膜しても応力・応力傾斜がなく、しかも poly-Si 並みの優れた機械特性を有するので、集積化 MEMS の材料として適している。この論文では、作製プロセスの他、 SiO_2 などの絶縁膜に高電界を印加した場合にしばしば問題となる time dependent dielectric breakdown が論じられている。



b) Tilted SEM picture

図4 Poly-SiGe製 CMUT (IEEE MEMS 2012 プロシーディングスから引用)

4. 2 脳ドレナージ用 *in-vivo* 乳酸センサ

DEVELOPMENT OF A NOVEL CATHETER FOR EARLY DIAGNOSIS OF BACTERIAL MENINGITIS CAUSED BY THE VENTRICULAR DRAIN, Chunyan Li and Raj K. Narayan (Feinstein Institute for Medical Research and Hofstra North Shore-LIJ School of Medicine), pp. 120-123

著者は、MEMSの研究開発を成功させるには、用途の具体性が重要であると考えている。この論文では、脳ドレナージ中の細菌感染を *in-vivo* で早期発見するためのセンサを報告しているが、用途が明確であり、それゆえに実際的な研究開発が行われている。脳ドレナージを受けている患者には、普通、意識がなく、細菌感染症を早期発見することは難しい。したがって、ドレナージ用カテーテルの先端に装着し、細菌感染の有無を常時モニタリングするセンサが求められている。

細菌性髄膜炎になると、乳酸の濃度が増えることが知られており、これを測定することで、細菌感染の有無を診断できる。乳酸は乳酸オキシダーゼによってピルビン酸になるが、有酸素環境では酵素が再酸化されて H_2O_2 が発生する。乳酸センサ (図5) は、この H_2O_2 を電気化学的に測定するものである。したがって、検出部には乳酸オキシダーゼが固定され、その表面は酸素を供給する PVA ハイ

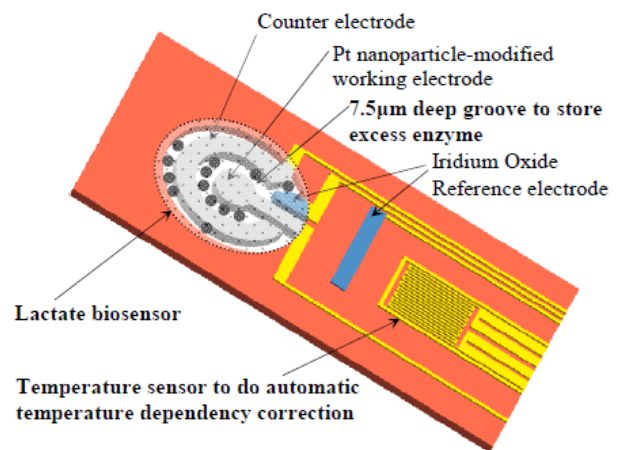


図5 脳ドレナージ用 *in-vivo* 乳酸センサの構造 (IEEE MEMS 2012 プロシーディングスから引用)

ドロゲルで覆われている。センサ構造はポリイミドフィルムに形成され、カテーテルに巻き付けて使用できるようになっている。実用化までの課題は少ないと思われるが、1週間の安定性や温度補償も実証されており、センサ単体としての完成度は高い。

5. 発表論文の紹介：プロセス技術

5. 1 高耐圧 SOI のハンドル層に作製する厚い MEMS

BELOW-IC POST-CMOS INTEGRATION OF THICK MEMS ON A THIN-SOI PLATFORM USING EMBEDDED INTERCONNECTS, V. Rajaraman, J. J. Koning, E. Ooms, G. Pandraud, K. A. A. Makinwa and H. Boezen (Delft University of Technology, Eindhoven University of Technology and NXP Semiconductors), pp. 220-223

ICとMEMSを集積化する技術としてSOIウェハを用いる方法は、慣性センサなどに利用されている。この方法では、SOIウェハにICを形成する際、MEMS構造体を形成する領域を空けておき、そこにデバイス層を構造材料とし、埋め込み酸化膜層を犠牲材料として、MEMS構造体を作製する。この方法によると、ICとMEMS構造体が平面内で隣り合うことになるが、チップ面積を小さくする、つまり低コスト化するには、ICの直上または直下にMEMS構造体を形成することが望ましい。

この論文では、SOIウェハのハンドル層にMEMS構造体を形成する技術を報告している。用いている

IC プロセスは、NXP Semiconductors の bipolar-CMOS-DMOS SOI 技術であり、耐圧 110 V の IC を提供する。図 6 に示すように、回路と poly-Si ビアを形成した SOI ウェハをガラス支持基板に貼り付け、ハンドル層を適当な厚さに研磨した後、そこに MEMS 構造体を作り込む。ハンドル層を利用するため、厚い MEMS 構造体を作れるだけでなく、回路の直下にも MEMS 構造体を配置できる。実際に回路の直下に MEMS 構造体を作製し、トランジスタの特性に変化がないことが確かめられている。

5. 2 陽極接合できる LTCC ウェハを用いた MEMS のパッケージング

VERSATILE WAFER-LEVEL HERMETIC PACKAGING TECHNOLOGY USING ANODICALLY-BONDABLE LTCC WAFER WITH COMPLIANT POROUS GOLD BUMPS SPONTANEOUSLY FORMED IN WET-ETCHED CAVITIES, Shuji Tanaka, Mamoru Mohri, Atsushi Okada, Hideyuki Fukushi, Masayoshi Esashi (Tohoku University and Nikko Company), pp. 369-372

硼珪酸ガラスウェハを Si ウェハに陽極接合して MEMS を気密封止する方法は、信頼のおけるパッケージング技術として広く用いられている。このとき、気密封止された空間から配線を取り出すことは必ずしも容易ではなく、これまでに様々な方法が開発されてきた。東北大学とニッコーは、MEMS 用パッケージング材として陽極接合できる LTCC (low temperature cofired ceramic) ウェハを開発したが、現在、これは多くの企業に注目して頂いている。その特長は、内部に任意の貫通配線を形成できること、気密封止の信頼性が高いこと、従来の硼珪酸ガラスウェハと同様のプロセスで接合できることなどである。

この論文では、陽極接合できる LTCC 基板の貫通配線と MEMS とを電気的に接続する簡便かつ確実な方法を提供している。図 7 に示すように、LTCC 基板のビアを含む領域をウェットエッチングすると、Au 製のビアはエッチングされずに残る。このとき、ビア内のガラス質フィラーは溶出するため、残されたビアは自然に多孔質になり、これが変形性に富むバンプとして利用できる。変形代はもともとのバン

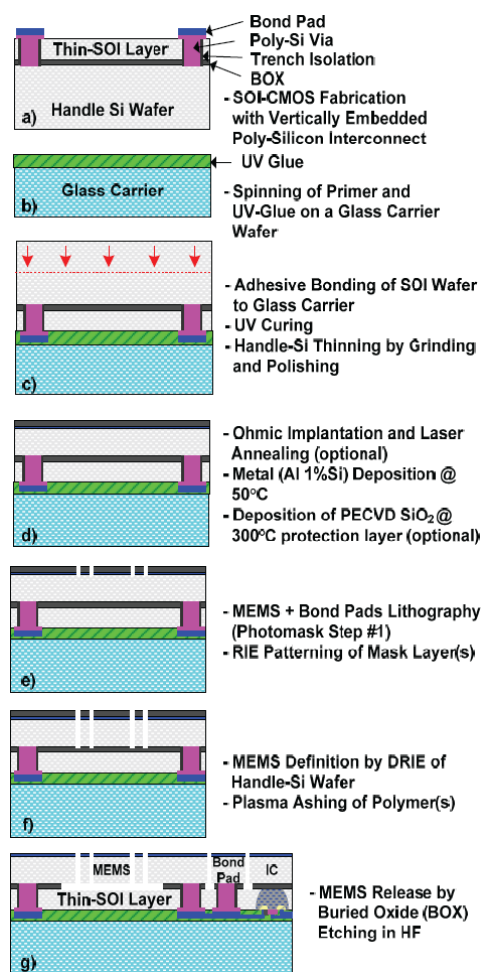


図 6 高耐圧 SOI のハンドル層を用いた集積化 MEMS の作製プロセス (IEEE MEMS 2012 プロシーディングスから引用)

プ高さの半分程度と大きく、加工誤差にかかわらず、確実な電気接続が行えることが利点である。熱衝撃試験によって、電気接続と気密封止の信頼性が確認されている。

6. おわりに

ここで紹介した論文は、343 件中のわずか 8 件でしかない。応用が非常に多岐にわたる MEMS では、いわゆる全体傾向というものの特になく、件数は限られても、著者が選んだ論文を紹介することが国際会議報告として有用であると考えた。IEEE MEMS 2012 のプロシーディングスは、既に IEEE Xplore で閲覧可能である。数行のアブストラクト付きのプログラムは無料で閲覧できるので、興味のある方は確認して頂きたい。

次回の IEEE MEMS は、京都大学の土屋先生と国立精華大学（台湾）の李先生がチェアを務められ、2013 年 1 月 20～24 日に台湾、台北で開催される。論文投稿の締切は 9 月 10 日である。

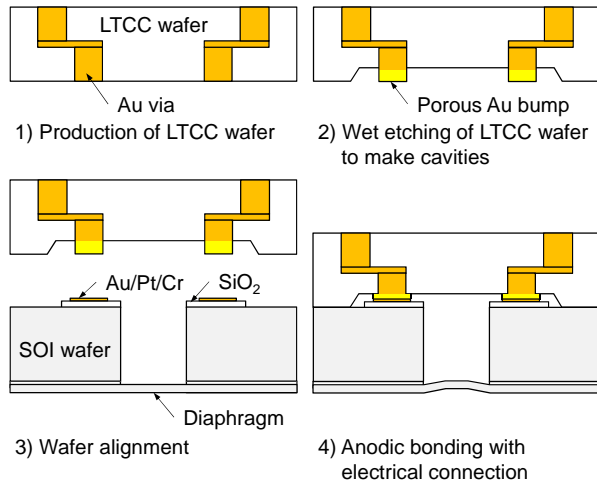


図 7 陽極接合できる LTCC ウェハを用いた MEMS の気密封止・電気接続の方法：ここでは、気密封止の確認のためダイヤフラムが用いられている。