

田中 秀治
東北大学
大学院工学研究科ロボティクス専攻
マイクロシステム融合研究開発センター



1. 論文の国別シェアに思う

IEEE MEMS は、300 件に近い論文発表が行われる MEMS 分野のフラッグシップ国際会議である。今年は 2019 年 1 月 27~31 日に韓国・ソウルで、東京大学の竹内昌治教授と KAIST の Jun-Bo Yoon 教授をチェアとして第 32 回目が開催された。IEEE MEMS 2019 には 677 件のアブストラクト投稿があり、我々は 2018 年 10 月 12~13 日に東京に集まり、281 件の論文を採択した。論文の国別シェアは、中国 71 件、米国 63 件、日本 57 件、韓国 34 件、台湾 18 件と続く。2010 年に IEEE MEMS がはじめて中国（香港）で開催されたとき、中国の論文が 14 件に急伸したことを中国の友人らは喜んだが、それから 10 年も経っていないのに隔世の感がある。

中国からのアブストラクト投稿の伸び率は高く、一方、他の国からのそれは一定か、むしろ減っている。近い将来、中国の論文が半数を占めることになるかもしれない。実際、中国での MEMS のアクティビティは産学官で急激に高まっている。私は 2017 年 10 月、2018 年 11 月、2018 年 12 月、2019 年 4 月と中国で続く MEMS 工場の建設をあるウェブサイトで報告したが（図 1）、これらは一握りに過ぎない。現在、MEMS ファウンドリにはフル操業のところが多く、需給がひっ迫しているが、投資がニーズに勝って過剰になれば、値崩れする。超音波指紋センサ、MEMS スピーカ、カメラまわりの MEMS など、出荷数が期待できる新しい MEMS が待ち構えているので、これらの研究開発が順調に進んで、市場規模が健全に拡大する必要があるだろう。

話題がそれだが、以下に IEEE MEMS 2019 の論文をいくつか紹介する。



図 1 北京郊外に建設中の北京耐威科技股份有限公司 (Beijing NAV Technology) 傘下の Silex Technology の 8 インチ MEMS 工場 (2019 年 3 月撮影) 詳細は QR コードから

2. 0.12 mm²の加速度センサ

MEMS も半導体デバイスの仲間であり、その競争力の 1 つの源泉は小ささにある。単純に考えて、3 mm 角のセンサに対して 1 mm 角のセンサは、ダイのコストで約 10 倍の優位性がある。1 cm 角や 2 cm 角といった「ばかどかい」ダイは、よほどの付加価値がなければ、実用にならない。10 年程前、IMEC は、22 mm × 46 mm と巨大な 1100 万画素のマイクロミラーアレイを開発した。これはオランダ・ASML のマスクレス・エキシマレーザー露光装置の空間光変調器という超高付加価値 MEMS であった。同じくらい大きさでも、振動発電 MEMS ではペイしないであろう。

さて、大きい方の話で脇道にそれたが、本題は小さい方の話である。IEEE MEMS 2019 では、LETI とミラノ工科大学から 0.12 mm² と小さい z 軸加速度センサが発表された ([1] F. Maspero, S. Delachanal, A. Berthelot, L. Joet, G. Langfelder, S. Hentz, OUT-OF-PLANE COMB-FINGERS FOR A LOW-NOISE, 0.12-MM² Z-AXIS ACCELEROMETER FABRICATED WITH A 3D MEMS PROCESS, Proc. IEEE MEMS 2019, pp. 692-695)。もしダイが正方形なら僅か 0.35 mm 角ということになる。ただし、ウェハレベルパッケージは含まれていない。その性能は、ノイズ密度 50 μg/√Hz, 共振周波数 10 kHz であり、ダイの面積が 10 倍程度の z 軸加速度センサのそれと比べてもひけを取らない。実は今年の IEEE MEMS でその原型が発表されたが、今年のは格段に完成度が高い。

図 2 にダイの電子顕微鏡写真を、図 3 に構造を示す。一見して複雑な構造である。この構造は、エピポリ Si プロセスとウェハ接合を組み合わせで作られている。エピポリ Si プロセスは、パターニングされた酸化膜上に成膜される 20 μm 以上と厚いエピポリ Si を用いた MEMS プロセスであり、STMicroelectronics や Robert Bosch が標準的に用いている。これについては本誌 Vol. 28, No. 1 (2018) pp. 38-41 で解説している（詳細は図 4 の QR コードから）。

図 2 で 400 nm 幅の櫛歯電極が下層から伸びているが、これは図 3 に示すように、エピポリ Si プロセスによって酸化膜を介さずに基板“Thick layer”に直接固定されており、犠牲層エッチングの際、取れてしまわない。一方、“Thin layer”のうち基板から絶縁される部分、および犠牲層エッチングによって基板からリリースされる部分は酸化膜上に形成される。

この構造のキーポイントは、マスが“Thick layer”でできていて重く（よって、ブラウンノイズが小さく）、しかも容量検出が差動になっており、その結果、小さいのに SN 比が高いということである。特に、差動検出は図 2 に示す“Moving grid”と“Fix grid”によって巧妙に実現されている。正直、白黒刷りの本誌で、この構造をわかりやすく説明することは難しいので、興味のある方はカラーの原典を見て欲しい。

ところで、図 2 の構造を見て思い起こされるのは、

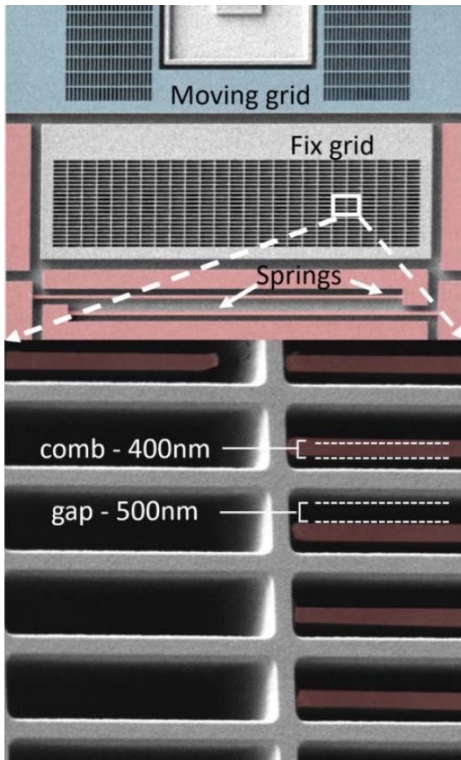


図2 0.12 mm²のz軸加速度センサの電子顕微鏡写真(文献[1]から引用)

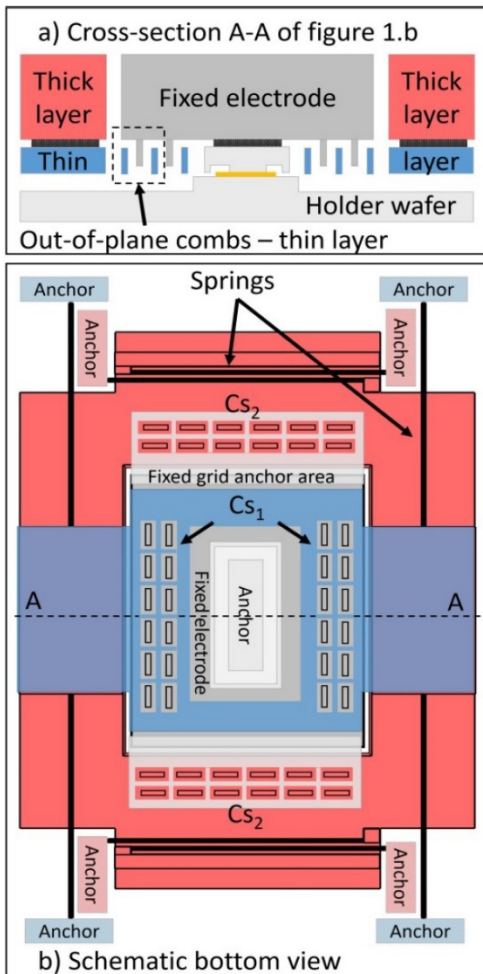


図3 0.12 mm²のz軸加速度センサの構造(文献[1]から引用)

Robert Bosch の3層ポリ Si プロセスである。これについても本誌 Vol. 28, No. 1 (2018) pp. 38-41 に解説している。図4 にこのプロセスで作られたz軸加速度センサの電子

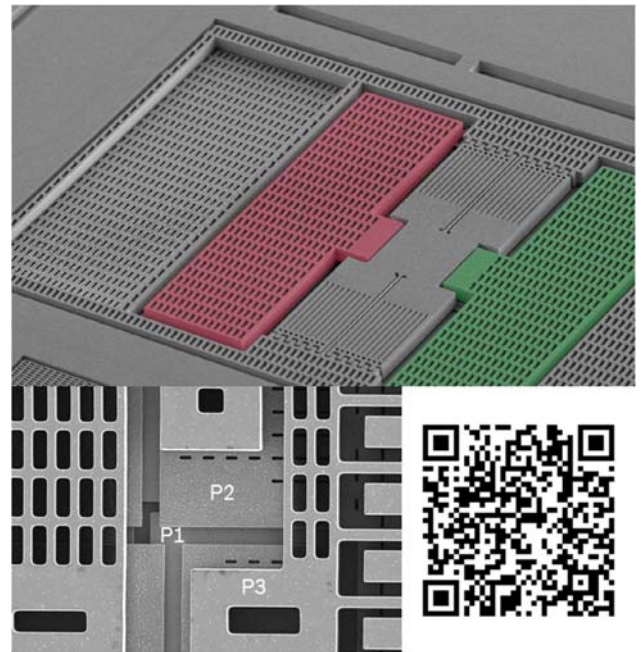


図4 Robert Bosch の3層ポリ Si プロセスで製造されたz軸加速度センサ (J. Classen, J. Reinmuth, A. Kälberer, A. Scheurle, S. Günther, S. Kiesel, B. Schellin, J. Bräuer, L. Eicher, ADVANCED SURFACE MICROMACHINING PROCESS – A FIRST STEP TOWARDS 3D MEMS, Proc. IEEE MEMS 2017, pp. 314-318 から引用) 詳細はQRコードから

顕微鏡写真を示す。配線層, 第1構造層, および厚い第2構造層(エピポリ Si)の3層を用いることで, 構造設計の自由度が高く, 理想的なセンサ構造を採用できる。このセンサでは, 対称構造, 1点支持, および二重差動検出によって, 自動車応用に求められる高い安定性が実現されている。

これら2つのセンサを見て思うことは, MEMSでも最先端のプロセス技術なしには, よい設計はできないということである。前世代的なSOIプロセスだけで勝負することは難しい。メインストリームのMEMSでIDM(Integrated Device Manufacturer)が強い理由の1つである。

3. トランスファ法によるガラス上のPZT薄膜

次に少し地味な論文を紹介したい。偶然にも再びLETIの論文である。その論文は, ガラス上に作られた圧電ハプティック(触覚提示)デバイスに関するものである([2] F. Casset, G. Le Rhun, B. Neff, B. Desloges, C. Dieppedale, S. Fanget, LOW VOLTAGE HAPTIC SLIDER BUILT USING SOLGEL THIN-FILM PZT ACTUATORS REPORTED ON GLASS, Proc. IEEE MEMS 2019, pp. 990-993)。図5に示すハプティックデバイスの大きさは2 cm × 10 cmであり, ディスプレイとの一体化が想定されていると思われる。薄膜PZTアクチュエータを用いてガラス板に板波を励振し, ガラス板と指の間の摩擦係数を変化させる。10 Hzで駆動したとき, 指に触覚効果が得られたというが, それはさておき, ガラス上にどうやってPZT薄膜を形成しているのか, それが問題である。

PZTの成膜はゾルゲル法またはスパッタ法で行われるが, いずれにせよ600°C程度以上の高温で行われるため, ガラス上では難しい。ここでは, 別の基板にゾルゲル法によって形成された550 nm厚のPZT薄膜がトランスファ法によってガラス基板に転写されている(図6)。詳細は報告されていないが, 次のようなプロセスだと推察

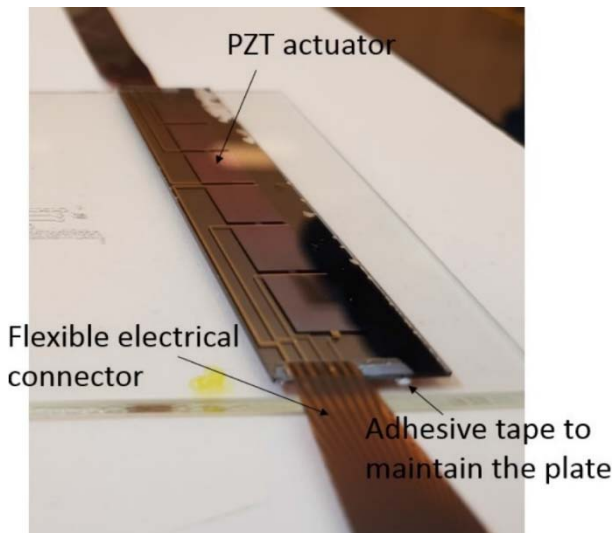


図5 ガラス上に作られた圧電ハプティックデバイス (文献[2]から引用)

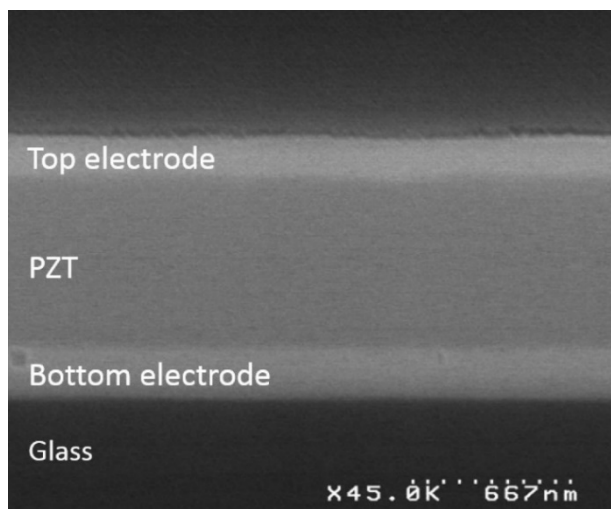


図6 ガラス基板上に転写されたPZT薄膜 (文献[2]から引用)

される。Si 基板に MgO または ZnO の犠牲層を介して Pt/PZT/Pt 層を形成する。その上に Au 層を形成し、ガラス基板上に形成した Au 層に熱圧着する。MgO または ZnO をそれぞれリン酸または酢酸でエッチングして、Pt/PZT/Pt 層をガラス基板上に転写する。以前、著者らは、サファイヤ上に成膜した BST 薄膜を LT 基板上に転写して、集積化チューナブル SAW フィルタを開発したが、そのときは犠牲層を使わず、レーザー剥離を行った。いろいろ試したものの、BST 薄膜に適した犠牲層が見つからなかったためである。

ガラス上の PZT 系薄膜は、重要な応用可能性を秘めている。これが、一見、地味な論文を紹介している意図である。まず、超音波指紋センサである。2017 年に Qualcomm のインディスプレイ型超音波指紋センサが Vivo のスマートフォン XPlay 7 に搭載されて以来、超音波指紋センサは世間でも注目の新しい MEMS である。このときは、認識率が悪いという噂で、搭載機種は広がらなかった。しかし、改良されたものが、サムソン電気の最新フラッグシップ・スマートフォン Galaxy S10 に搭載されている。今年、背面指紋センサがインディスプレイ型に移行するのが流行るようであり、光学式と超音波式には飛躍のチャンスがある。Qualcomm の超音波指紋センサは、TFT 技術を用いてガラス基板上に形成され、

AIN 薄膜を圧電トランスデューサに利用している。TDK-InvenSense が開発している超音波指紋センサも AIN 薄膜を利用している (図 1 の QR コードから 2017 年 10 月の記事を参照)。

トランスファ法を用いれば、これらの AIN 薄膜を別の圧電薄膜に代えられる可能性がある。一般的な PZT 薄膜を用いて超音波指紋センサを高性能化できるとは限らないが、単結晶 PZT 薄膜を用いれば、可能である。表皮の指紋だけではなく、真皮やさらにその奥の構造を検出できれば、より安全性の高い指紋認証が実現できる。

もう 1 つの応用可能性は、オートフォーカス用可変レンズである。現在、スマートフォンのオートフォーカス機能はボイスコイルモータによって実現されているが、これ以上の低背化は難しいと言われている。また、電磁アクチュエータの原理から静止させているときにも電流が必要なため、省消費電力化も難しい。そこで、薄膜 PZT アクチュエータを用いた可変レンズが、Wave Lens, PoLight などのベンチャー企業によって開発されている。PoLight のものは、ガラス基板上に形成した PZT 薄膜によってガラス基板と透明ゲルを変形させる原理による。このデバイスの製造は STMicroelectronics が請け負っているらしいが、どうやってガラス基板上に高性能圧電アクチュエータを形成するのかは、最も重要なキーポイントの 1 つであろう。

3. 分子長を認識するガスセンサ

最後に紹介したいのは、その発想に感心したガスセンサに関する University of Utah からの 2 つの論文 ([3] S. H. Khan, A. Banerjee, S. Broadbent, P. D. Kairy, K. H. Kim, C. H. Mastrangelo, R. Looper, H. Kim, MOLECULAR LENGTH BASED TARGET IDENTIFICATION USING A NANO-GAP SENSOR, Proc. IEEE MEMS 2019, pp. 460-463, [4] S. H. Khan, A. Banerjee, S. Broadbent, A. Bulbul, M. C. Simmons, K. H. Kim, C. H. Mastrangelo, R. Looper, H. Kim, STATISTICS-BASED GAS SENSOR, Proc. IEEE MEMS 2019, pp. 137-140) である。ただし、報告されているセンサは「使えるもの」にはなっていない。ワンチップのガスセンサは、大抵、検出部にガスが吸着して、酸化物半導体等の抵抗が変わったり、質量が変化して振動周波数が変わったり、応力が変化して振動周波数や変形が変わったりといった原理による。それに対して、この論文のガスセンサは、数ナノメートル以下のギャップを丁度よい長さのガス分子がブリッジしたときに電流が流れるという原理を利用するという。図 7 にその原理を示すが、「本当か?」と思いたくなる発想を試したところがすごい。

ナノギャップは、ALD (Atomic Layer Deposition) による 4 nm 厚の SiO₂ とスパッタ法による 1 nm 厚のアモルファス Si をサイドサイドエッチングして作製される。その表面を 3 つのフェニル基が繋がったリンカーで修飾する。原理確認実験には、エチレンジアミン (NH₂-CH₂-CH₂-NH₂)、プロパンジアミン (NH₂-CH₂-CH₂-CH₂-NH₂)、およびカダベリン (NH₂-CH₂-CH₂-CH₂-CH₂-CH₂-NH₂) を被検出分子として用いたが、それぞれ長さは 0.3 nm, 0.45 nm, および 0.75 nm である。図 8 にその結果を示す。1329 ppm 相当の (ポリマー化が起こる程) 濃いガス雰囲気中にセンサを晒したところ、ナノギャップの抵抗ははっきり下がり (スイッチオンし)、分子による振る舞いの違いも観察されている。しかし、これが図 7 に示したような形で起こっているかはわからない。

ナノギャップのブリッジは確率的に形成されるので、

図9に示すように多数のナノギャップを用意して、それらの直並列の抵抗変化を見るというアイデアが文献[4]に披露されている。その実験結果は図8と類似の傾向である。要約すれば、スイッチオンさせやすい分子は、スイッチオフに時間を要し、その逆も真である。ただし、アレイ化によって再現性と信頼性は向上した。感度と復帰特性、さらに感度とドリフト安定性はトレードオフの関係にあるというのが、分子吸着に基づくケミカルセンサ、特に低温(=省電力)ケミカルセンサの宿命であり、このセンサも例に漏れない。ケミカルセンサには、この宿命から逃れられる技術が切望されていると思う。

この研究の動機は、ほぼ消費電力無しで待機し、イベント発生時にはじめて動作する「イベントドリブン型センサ」を実現したいというもので、それを目的とする米

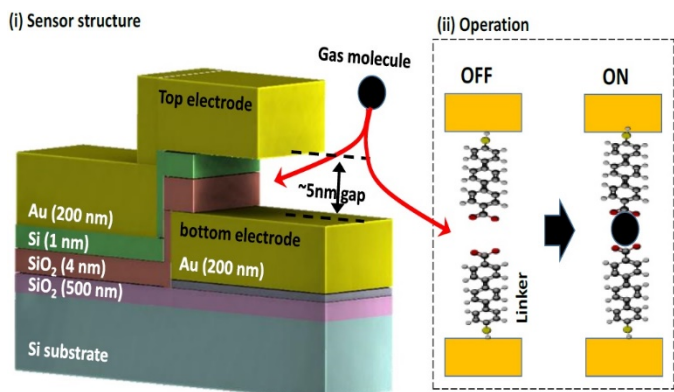


図7 ナノギャップの分子ブリッジによるガスセンサの想定原理(文献[3]から引用)

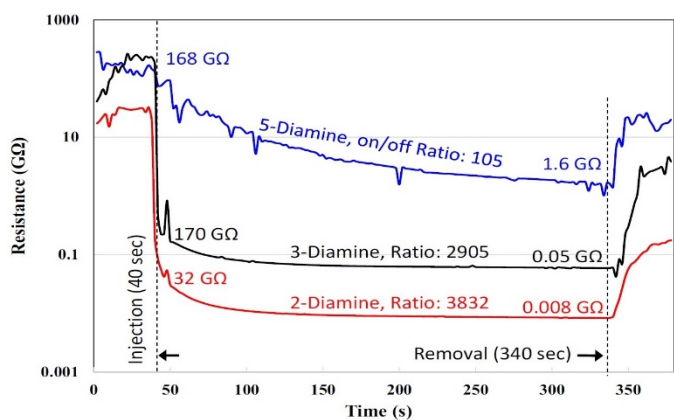


図8 長さの異なるガス分子に晒したときのナノギャップの抵抗変化(文献[3]から引用)

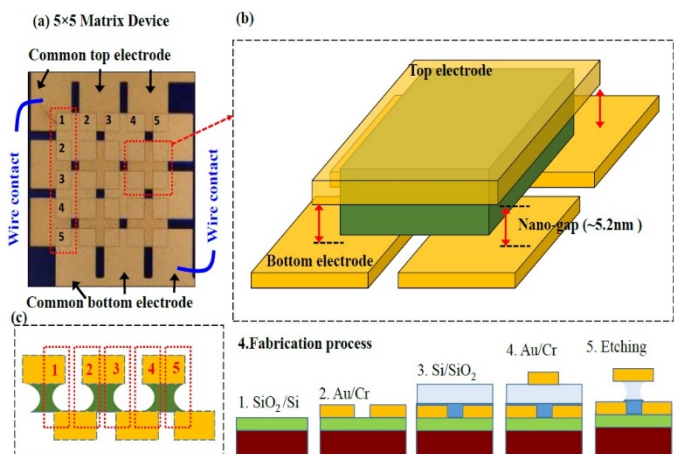


図9 アレイ型のナノギャップガスセンサ(文献[4]から引用)

国・DARPA “N-ZERO Program”が進められている。IEEE MEMS 2019では、このプログラム下の研究成果がいくつか発表されている。無数のセンサをばらまくIoTで、電源の問題はやはり深刻だからである。

4. おまけの間違い探しクイズ

この解説を終るにあたり、間違い探しクイズを出そう。図10の(a)と(b)の大きな違いをあげて欲しい。(a)は2018年8月の国際会議ウェブサイト、(b)は2019年1月のそれである。答えは、前者にはIEEEのロゴがないが、後者にはあるという違いである。国際会議のマーク(ソウルの南大門を模したもの?)の中にある会議名にも、「IEEE」の有り無しの違いがある。2018年8月までは、IEEEを冠せない理由があったわけだ。その理由はさておき、図10(b)でIEEEのロゴの右にあるMEMSのロゴは、2018年9月末にできたIEEE MEMS Technical Communityのものである。今後、このコミュニティで力を合わせてMEMS技術を盛り上げていきたいと著者は強く思っている。



(a) 2018年8月のもの



(b) 2019年1月のもの

図10 MEMS 2019のウェブサイト