

MEMS技術の課題と展望

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構

教授 江刺 正喜



1 はじめに

半導体集積回路は多数のトランジスタからなり、高度な情報処理を行う。光でマスクパターンを一括転写して作れるため量産効果があるが、微細化とともに設備投資は巨大化している。電子回路だけでなくセンサやアクチュエータなどの異なる要素を融合してチップ上に作る、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) やマイクロシステムと呼ばれる技術によって、システムで重要な働きをする高付加価値のデバイスを供給することができる[1]。以下ではMEMS技術実用化の経緯、および集積化MEMSの例について述べた後、MEMSの実用化を支援するオープンコラボレーションを紹介する。

第1図に、MEMSの例として静電浮上回転ジャイロを示す[2]。外径1.5 mmのシリコン製のリング状ロータが浮上して毎分7万4千回転し、2軸周りの回転と3軸方向の加速度を高精度に同時に検出できるため、ナビゲーションなどに使われている。ロータの位置は静電容量で検出し、電圧を印加して静電引力で浮上させたり、また回転させたりするのを高速デジタル制御で行っている。

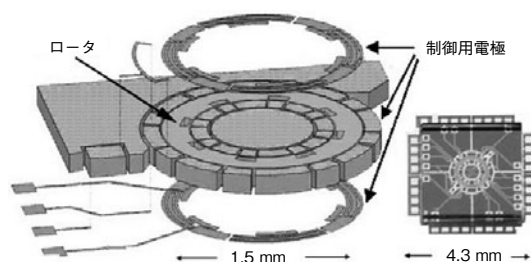
上のようなハイエンドの少量品から、スマートフォンのユーザーインターフェースに使われる加速度センサのような大量生産品までMEMS技術は広く使われ、売上高は毎年15%ほどの割合で成長している。MEMSは多様な品種ごとに異なり、少量の場合には開発費用の回収が難しいため採算が合わないことが多い。量産効果を生かし

た大量生産品で、欧州や台湾はわが国に比べて優位にある。

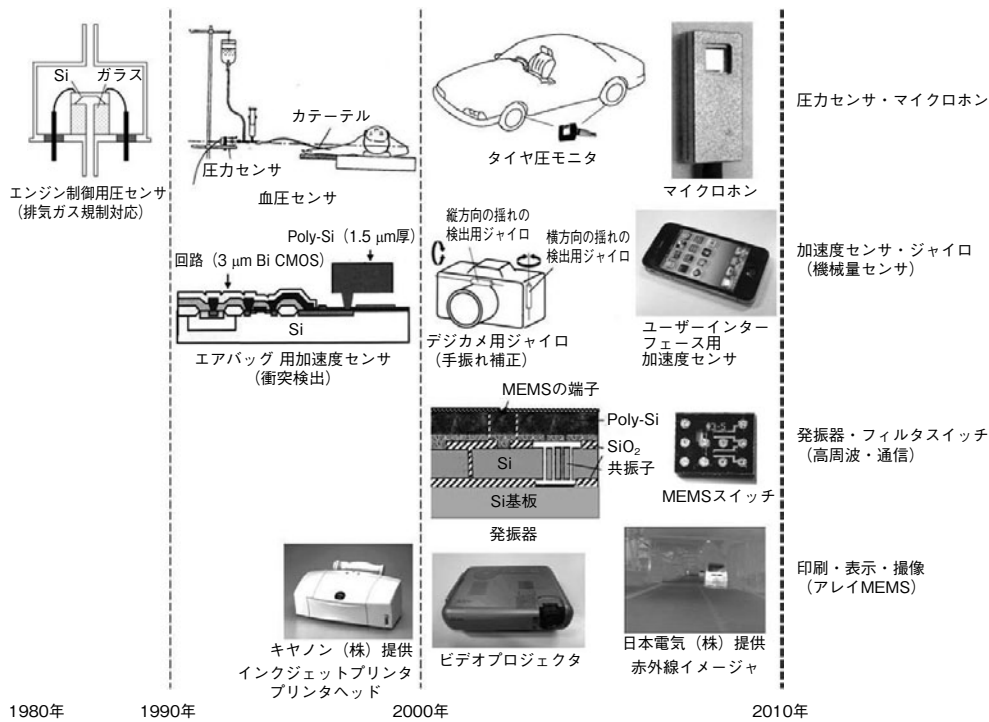
MEMS技術の実用化の経緯を、第2図に示す。1970年代に始まり1980年代に圧力センサが自動車のエンジン制御に使われた。1990年に入ると自動車にエアバッグが搭載され、衝突検出に加速度センサが用いられるようになった[3]。2000年頃からジャイロ (角速度センサ) が自動車の安全装備やデジタルカメラの手振れ防止などに使用されている。加速度センサやジャイロはゲーム機やスマートフォンのユーザーインターフェースでも活躍している。最近ではマイクロ機械共振子を用いた発振器が高周波関係に使われ始め[4]、MEMSスイッチも実用化されている[5]。MEMS技術は小形化の特長に加え、回路と共に多数配列して作れるため画像関係に適する。1990年代からインクジェットプリンタヘッドに使用され、2000年頃からはビデオプロジェクタ用のミラーアレイや熱型赤外線イメージャなどに用いられている。情報・通信関係や自動車関係などでは比較的大量に使われている。このほか集積回路の検査に用いるプローブカードあるいは走査型プローブ顕微鏡 (SPM: Scanning Probe Microscope) 用の探針などの製造・検査関係、光スキャナなど安全・環境関係、また検体検査や血圧計のようなバイオ・医療関係など、システムの鍵を握る部分で使われている。

2 集積化 MEMS

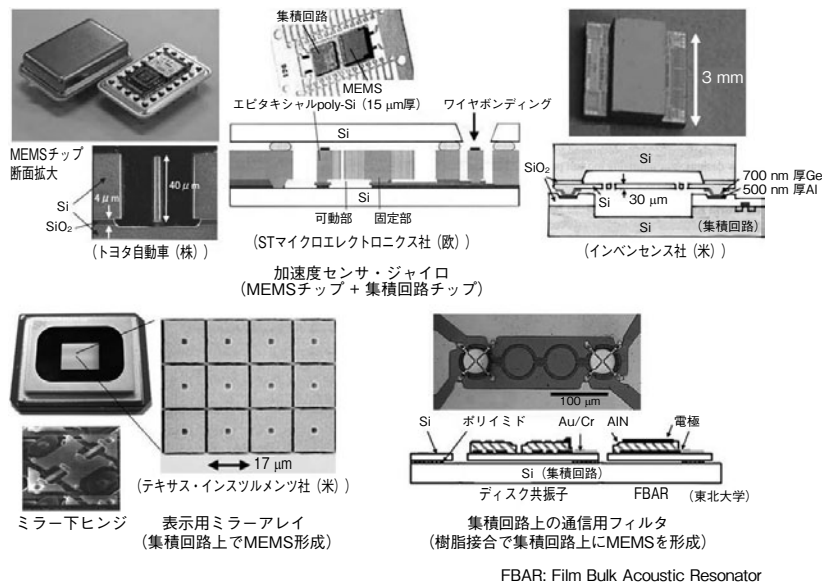
回路とMEMSを組み合わせた集積化MEMSを、第3図に示す。微小な静電容量の変化を検出する容量型センサでは、寄生容量の影響を受けないように容量検出回路をセンサの近くに配置することが望まれる。このためCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 回路を一体化した集積化容量型圧力センサが開発された[6]。CMOS回路上に犠牲層とポリSi構造層 (厚さ1.5 μm) を堆積し、犠牲層をエッチングして構造層を残す表面マイクロマシニングと呼ばれる方法により、集積化容量型加



第1図 静電浮上回転ジャイロ (東京計器 (株))



第2図 MEMS技術の実用化の経緯



第3図 各種集積化MEMS

速度センサが作られエアバッグ用衝突センサなどに用いられた[3]. しかし、ポリSiを堆積した後、応力を厚さ方向で均一にするために熱処理（1100℃，3時間）をする必要があり、回路がその熱処理に耐える必要があった。このため加速度センサ・ジャイロのような容量型センサのMEMSチップと、容量検出のための集積回路チップを、別にして隣接させ接続する方法が用いられるようになった。

た。第3図上の左の自動車用の場合はSOI（Silicon On Insulator）ウエハの単結晶Si（厚さ40µm）を[7]，また中央のユーザーインターフェース用の場合は厚いポリSi（厚さ15µm）を[8]，容量型センサに用いることによって静電容量を大きくしている。このため応力が生じないようにして厚く堆積できる，エピタキシャルポリSiの技術が開発された[9]。右の場合にはMEMSセンサを形成

したSOIウェハをAl-Geの共晶接合でCMOSウェハに接合し、封止と電氣的接続を行っている[10]。なお、これらの加速度センサ・ジャイロの場合には、ばね材として優れたシリコンでMEMSを形成している。

第3図の左下はDMD (Digital Micromirror Device) と呼ばれるビデオプロジェクタに用いられるミラーアレイである[11]。CMOS回路上に100万個ほど、アモルファス金属 (Al₃Ti) の可動ミラーが作られており、それぞれのミラーが動いて光をオンオフし画像を表示する。

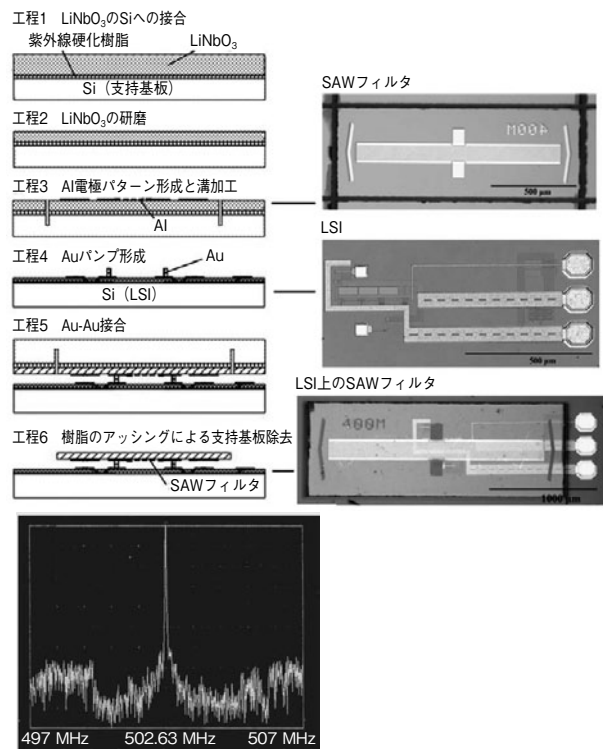
無線携帯機器のマルチバンド化の目的で集積回路上にマイクロ機械共振子によるMEMSフィルタを形成する場合には、ばね材として優れた材料や圧電材料などによるMEMSを作り、しかも寄生容量や寄生インダクタンスなどを少なくする必要がある。第3図の右下はその例である[12]。この場合に集積回路を壊さないようにするため、樹脂接合などを用いた集積化MEMSの開発が行われている[13]。

以下では、このような集積化MEMSの例として表面弾性波SAW (Surface Acoustic Wave) デバイスを形成した集積回路を紹介する。第4図には、その製作工程を示す[14]。ニオブ酸リチウム (LiNbO₃) の単結晶ウェハを、支持基板としてのシリコンウェハに紫外線硬化樹脂でより付ける (工程1)。LiNbO₃を研磨して薄くした後 (工

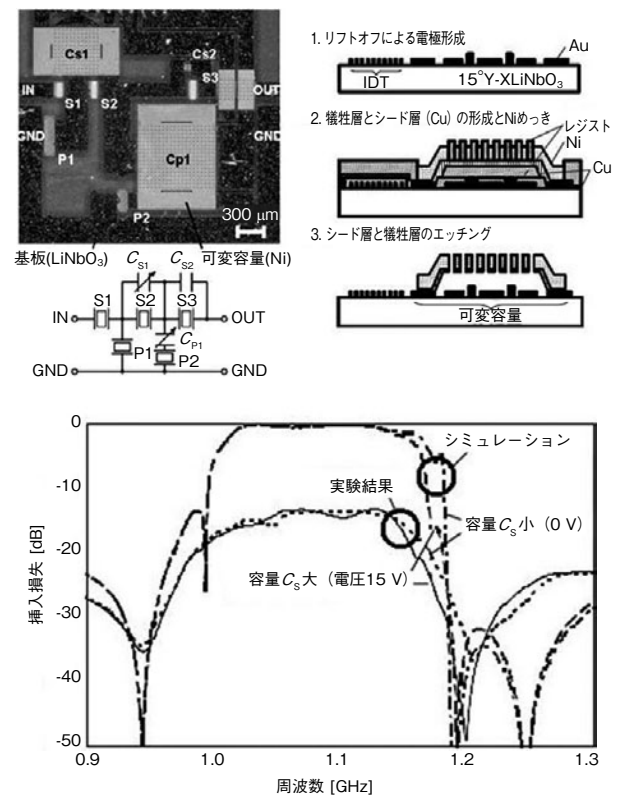
程2)、SAWデバイスのアルミニウム電極や接続部の金を形成し、溝加工を行う (工程3)。集積回路ウェハにフォトレジストを鋳型として用いて金をめっきし、表面を平らにして接合用のバンプを形成しておく (工程4)。集積回路ウェハ上の金バンプとLiNbO₃ウェハ上の金を接合する (工程5)。最後に樹脂をエッチングすることで支持基板を取り外して完成する (工程6)。LiNbO₃とシリコンは熱膨張係数が異なり、それによる熱応力を避ける必要がある。このため図の写真でわかるように、バンプは片側だけに形成する。この集積化MEMSによるSAW発振器の約500 MHzでの発振スペクトルを、第4図に示す。各種樹脂をより合わせに用いているが、これらを除去するため、酢酸にオゾンを溶解してエッチングする技術を開発している[15]。

静電引力で電極間隔を変えるMEMS可変容量をSAWデバイスに一体化した、可変周波数フィルタを、第5図に示す[16]。図中に示すようなSAWデバイスによる通過帯域フィルタで、直列や並列に接続した静電容量を変化させるもので、図中のC_pによって通過帯域の低域しゃだん周波数を上げ、またC_sによって高域しゃだん周波数を下げることができる。

第4図で述べたようなMEMSデバイスは、表面に機械



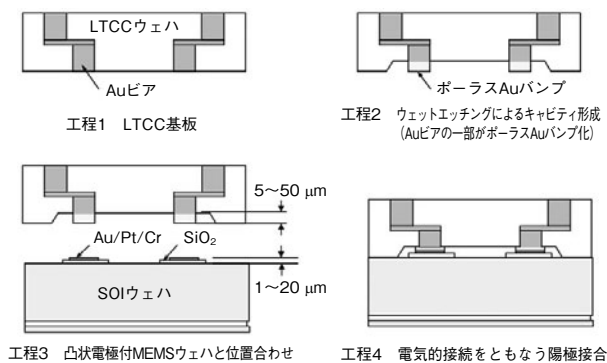
第4図 表面弾性波 (SAW) デバイスを形成した集積回路とその発振スペクトル



第5図 MEMS可変容量一体型の可変周波数SAWフィルタ

特
集

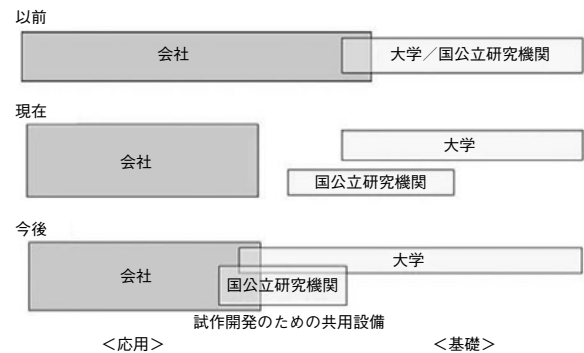
的に動く構造を形成してあるため、通常の集積回路のように樹脂で封止することはできない。このためウェハ状態で蓋（ふた）をするウェハレベルパッケージングが不可欠である[17]。第6図のように、シリコンと熱膨張を合わせた低温焼成セラミクスLTCC（Low Temperature Co-fired Ceramics）に貫通配線を形成したものをウェハ状態で接合し蓋をする技術を開発し用いている[18]。貫通配線は焼成前のLTCC基板にパンチングで穴あけして金ペーストを入れ、それを複数枚はり合わせて焼成して製作する（工程1）。LTCCの一部をエッチングすると、金の貫通配線は成分が溶出して多孔質になる（工程2）。この多孔質な金が接合時につぶれるため電極の高さがあっても電気的接続を行うことができる。LTCCをシリコンに接合するには温度を350℃程度にし、LTCCに数百Vの負電圧を印加することによって接合界面で静電引力をかける陽極接合が用いられる（工程3、工程4）。



第6図 基貫通配線付LTCCによるウェハレベルパッケージング

3 オープンコラボレーション

以前は会社がある程度の基礎から研究開発できたが、グローバル化による競争激化で開発を短期でせざるを得なくなった。このため、第7図のように基礎と応用が離れる傾向にあり、これがわが国の産業競争力低下の原因にもなっていると考えられる。大学は企業に比べリスクをかけられる場であるが、ある程度の形になるまで実現してみせないと産業につながらない。それには多数の設備が必要であるが、施設を共用しないと維持の手間を負いきれず費用的にも難しい。また、利用実績を重ねるなかで運用方法を改善し、協調しあいながら多様な形で利用されよう工夫する必要がある[19]。欧州では大学と公的研究機関が隣接し、公的研究機関の施設が学生に有効利用されている。わが国の場合には、縦割りによる無



第7図 基礎から応用へのつながり

駄を無くして人と情報と設備が共存するようにしなければならない。

多様化した技術を使いこなすには、幅広い知識に効率よくアクセスできる必要がある。オープンにして最新情報が集まるようにすると同時に、それを蓄積・整理して相談に来た会社などに提供している。特に技術の歴史的経緯や問題点をお伝えし、少し先のところから始めてもらえるようにすると、企業活動に有効である。企業からもニーズなどが伝わるので、研究室にとってもテーマ設定など参考になる。なお、企業から相談に来られた時の資料などで公開できないものは、持ち帰っていただいている。

国際的な連携も重要で、ドイツのフラウンホーファ研究機構と仙台市は2005年より協定を締結し、毎年「Fraunhofer symposium in 仙台」を開催している。また、同機構のENAS研究所長（Prof. Thomas Gessner）のスタッフ数名が研究室に常駐して共同研究を行っている。ベルギーにあるIMEC（Interuniversity Microelectronics Centre）は半導体分野で有名な研究機関で、わが国の関連企業からも多くの方が派遣されている。東北大学は米国のスタンフォード大学およびスイスのローザンヌ工科大学（EPFL）と共にIMECのStrategic partnerになっている。

仙台市を中心に行っている「MEMSパークコンソーシアム（MEMSPC）」[20]には70社ほどが会員になっている。年会費は5万円／口と安い。もともと情報はすべてオープンなので会員の特典は無い。しかし、これによる会費で「MEMS集中講義」を毎年3日間10年ほど開催してきた。2011年は京都（170名参加）、2010年はつくば（210名参加）と各地で行ってきたが、参加費や冊子、DVDなどを無料で配布している。無料にすると、引用を記載するだけで文献の図などを紹介できて著作権上の問題も無い。参加申込なども不要にして直接参加していただき、手間最小・中身最大になるようにしている。なお、MEMSPCの会費はiCAN（International Contest of Application in

Nano-micro technologies) と呼ばれるMEMS応用コンテスト[21]で、国際大会へ高校生や大学生を派遣する費用などにも当てられる。

東北大学の「マイクロシステム融合研究開発センター(μSIC)」[22]で16社と共同で進めている「先端融合領域拠点」は2007年度から10年間のプロジェクト(技術総括小野崇人)で、開発のコストやリスクを抑えるため、企業や学内の複数のグループと一緒に「乗り合いウェハ」として集積回路を外注し、そのウェハにそれぞれがMEMSを形成している。第4図の集積化MEMSによるSAW発振器も、この乗り合いウェハで試作した。基盤技術の知財は参加企業が自由に利用できるようにする「パテントバスケット」として大学が権利を保有し、応用技術の知財はそれぞれの企業と大学の共願としている。

MEMSの開発や少量生産の環境も重要である(第8図)。自作の設備を中心とした2 cm角ウェハ用の試作設備(第8図(a))を利用して、全工程を実際に経験した人材を育成できると同時に、自由度が高いため挑戦的な研

究を行うのに適している。この東北大学のMEMS試作実験室で「初期試作」を行う。産総研での8インチのウェハを処理する「量産試作」施設(第8図(b))で[23]、これを量産品に展開する。多品種少量品の開発や生産を行う場合、個々に設備投資すると採算が合わない。このため使わなくなった半導体製造施設を有効活用し、会社が人を派遣して利用する「試作コインランドリ」(第8図(c))を運営している[24]。第8図(e)には毎月の利用件数を示してあるが、利用者は増加して今まで60社以上の企業が利用している。なお、仙台に在る「MEMSファウンダリ」(第8図(d))で、中古の設備などを利用し、委託でMEMSの開発・生産などを行っている[25]。「MEMSファウンダリ」にとっても、「試作コインランドリ」を利用することによって設備投資しなくてすむため、少量品でも採算がとれる。このようなやり方は米国などでも行われているが、前者のように人を派遣して施設を利用する場合をPass-key、後者のように委託する場合をTurn-keyと呼ぶ。共用施設を利用して設備をもたず開発委託を行っている企業なども米国にはある。このように設備を借りて参入障壁を下げ、技術や人を育てながら製品化の見通しを探ることも有効と言える。これに関連して、多様な形態で開発や製品化ができるようになるための法整備なども、今後の課題と言える。

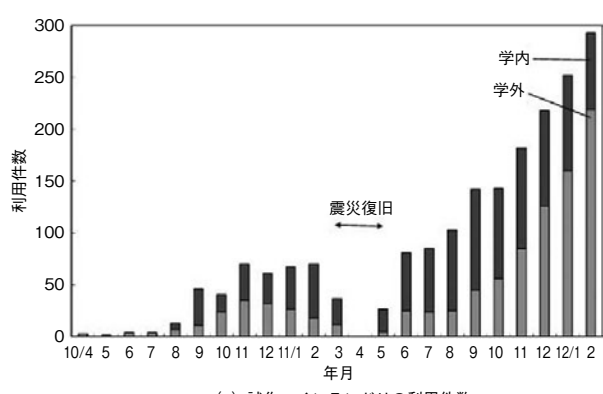


(a) 初期試作 (20 mm角ウェハ) (東北大)

(b) 量産試作 (8インチウェハ) (産総研)

(c) 試作コインランドリ (4/6インチウェハ) (東北大)

(d) MEMSファウンダリ (4/6インチウェハ) (株) MEMSコア



(e) 試作コインランドリの利用件数

第8図 試作・少量生産環境

4 おわりに

以上MEMS技術とその実用化の経緯について述べた後、集積化MEMSについて特に無線携帯機器のマルチバンド化の目的で集積回路上にマイクロ機械共振子によるMEMSフィルタを形成する場合の研究例を紹介した。MEMSは、一連の半導体製造設備が必要でしかも作り方が品種ごとに異なり、また多様な技術の組み合わせである。このための協力の仕組みとしてのオープンコラボレーションについて議論した。これらの努力によって高付加価値の部品が世に出て産業に貢献できることを願っている。

特
集

参考文献

- [1] 江刺正喜, “はじめてのMEMS,” 森北出版, 2011.
- [2] Takao Murakoshi et al., “Electrostatically levitated ring-shaped rotational-gyro/ accelerometer,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, Part1, no.4B, pp.2468-2472, 2003.
- [3] Frank Goodenough, “Airbags boom when IC accelerometer sees 50G,” Electronic Design, Aug. 8, pp.45-56, 1991.
- [4] 江刺正喜 他, “Si技術を使ったMEMS発振器 水晶発振器の置き換えを狙う,” 日経エレクトロニクス, no.923, pp.125-134, 2006.
- [5] 中村陽登 他, “RF MEMSスイッチの開発,” Advantest Technical Report, no.22, pp.9-16, 2004.
- [6] Yoshinori Matsumoto et al., “A miniature integrated capacitive pressure sensor,” Extended Abstracts of the 22nd International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, pp.701-704, 1990.
- [7] Masaru Nagao et al. “A silicon micromachined gyroscope and accelerometer for vehicle stability control system,” 2004 SAE World Congress, Detroit, 2004-01-1113, 2004.
- [8] 野口洋, “MEMS慣性センサの最新動向とその応用,” SEMI Technology Symposium 2008, 幕張, pp.45-51, 2008.
- [9] M. Kirsten et al., “Deposition of thick doped polysilicon films with low stress in an epitaxial reactor for surface micromachining applications,” Thin Solid Films, vol.259, pp.181-187, 1995.
- [10] J. Seeger et al., “Development of high-performance, high-volume consumer MEMS gyroscopes,” Technical Digest Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, Hilton Head Island, pp.61-64, 2010.
- [11] 帰山敏之, “デジタル・マイクロミラー・ディスプレイ,” 応用物理, vol.68, no.3, pp.285-289, 1999.
- [12] Takeshi Matsumura et al., “Multi-band radio-frequency filter fabricated using polyimide-based membrane transfer bonding technology,” J. of Micromechanics and Microengineering, vol.20, no.9, 095027(9pp), 2010.
- [13] Masayoshi Esashi et al., “MEMS on LSI,” ECS Transactions, dielectric and semiconductor materials, devices, and processing, vol.35, no.2, pp.319-330, 2011.
- [14] Kyeong-Dong Park et al., “Preparation of thin lithium niobate layer on silicon wafer for wafer-level integration of acoustic devices and LSI,” 電気学会論文誌E, vol.130-E, no.6, pp.236-241, 2010.
- [15] Hideaki Yanagida et al., “Simple removal technology using ozone solution for chemically-stable polymer used for MEMS,” Technical Digest IEEE MEMS 2011, Cancun, pp.324-327, 2011.
- [16] Toshihiro Yasue et al., “Wideband tunable love wave filter using electrostatically-actuated MEMS variable capacitors integrated on lithium niobate,” Technical Digest Transducers 2011, Beijing, pp.1488-1491, 2011.
- [17] Masayoshi Esashi, “Wafer level packaging of MEMS,” J. of Micromechanics and Microengineering, vol.18, no.7, p.073001(13pp), 2008.
- [18] Shuji Tanaka et al., “Electrical connection using submicron porous gold bumps for wafer-level packaging of MEMS using anodically-bonded LTCC wafer,” Technical Digest Transducers 2011, Beijing, pp.342-345, 2011.
- [19] 江刺正喜 他, “検証 東北大学江刺研究室 最強の秘密,” 彩流社, 2009.
- [20] <http://www.memspc.jp/>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [21] <http://www.rdceim.tohoku.ac.jp/iCAN12/>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [22] <http://www.mu-sic.tohoku.ac.jp/>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [23] <http://mnoic.la.coocan.jp/>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [24] <http://130.34.94.150/coin/index.html>, 参照 Mar. 5, 2012.
- [25] <http://www.mem-core.com/>, 参照 Mar. 5, 2012.

《プロフィール》

江刺 正喜 (えさし まさよし)

| | |
|---------|----------------|
| 1971 | 東北大学 工学部 卒業 |
| 1976 | 東北大学大学院 博士課程修了 |
| 1976 | 東北大学 助手 |
| 1981 | 東北大学 助教授 |
| 1990-現在 | 東北大学 教授 |

専門技術分野:

マイクロシステム, MEMS

主な著書:

半導体集積回路設計の基礎 (培風館, 1986)
電子情報回路 I, II (昭晃堂, 1989)
はじめてのMEMS (森北出版, 2011)

主な編書:

マイクロマシン (産業技術サービスセンター, 2002)
MEMSマテリアルの最新技術 (シーエムシー出版, 2007)