

田中秀治, 江刺正喜
東北大学 大学院工学研究科

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は半導体微細加工技術に基づいて作製されるセンサやアクチュエータのことで、圧力センサ、慣性センサ、インクジェットプリンタヘッド、プロジェクタ用イメージプロセッサなどとして身のまわりで使われている。MEMS は約 40 年の歴史を有し、しかも多種多様であるため、その全体像を把握することは容易ではない。本稿では、MEMS 分野で「バイブル」の 1 つに数えられる 1982 年の解説論文を話の出発点にし、過去から現在に至る MEMS 技術を、実用化を意識しながら解説する。

キーワード：MEMS, 集積化, センサ, アクチュエータ, シリコン

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の源流は今から 40 年以上前にあり、MEMS という言葉が生まれるずっと前である。ある技術を理解するにはその歴史をたどってみるのがよいが、MEMS 分野で、まず、お勧めしたいのは Kurt E. Petersen 博士による”Silicon as a Mechanical Material”という解説論文[1]である。これは 1982 年に出版されたが、今でも MEMS の中核を成す製品の原型となる試作例が多く紹介されている。また、「筋の良い」MEMS はどのようなものであるかについて、Petersen 博士のお考えを随所に垣間見ることができ、MEMS 分野では誰でも読んだことがある「バイブル」の 1 つに数えられている。

この解説論文は、はじめに機械材料としての Si の優秀性を説明した後、MEMS に用いられる主要な微細加工技術を紹介している。当時、Bosch プロセスや DRIE (Deep Reactive Ion Etching) と呼ばれる Si の深堀技術[2, 3]、および多結晶 Si を用いた表面マイクロマシニング技術[4]はまだ開発されておらず、微細加工技術の主役はウェットエッチングによるバルクマイクロマシニング、Si と硼珪酸ガラスとの陽極接合などであった。クリティカ

ルな寸法、たとえば、ダイヤフラムの厚さやノズルの大きさは、拡散層によるエッチストップ、フォトリソグラフィなどによるべきで、エッチング時間、ましてやウェハの厚さに依存するような加工方法はよくないといった基本的な考え方が説明されている。後半は試作例の紹介であり、インクジェットノズル、光ファイバカップラ、マイクロ流体デバイス、圧力センサ、加速度センサ、光スキャナ、メカニカル共振子、スイッチ、マイクロミラーアレイなどが登場する。

本稿では、Petersen 博士の解説論文を話の出発点にして、そこに紹介されているいくつかの試作例が、その後、どのように発展したかを簡単に紹介する。この解説論文は 38 ページもあり、MEMS 分野で仕事をされていない多くの方にとって重過ぎると思うので、本稿はそれを読んだことを前提としていないが、掲載されている図を見ながら本稿を読んで頂きたい。この解説論文で引用している文献については、本稿では引用を省略した。

2. センサ

当時、既に圧力センサは電子回路と一体になった形で実用化されていた。最初に開発されたのは、

Si の piezo 抵抗効果を利用した圧力センサである (Petersen 博士の解説論文の Fig. 34, 35 : 以降, P-Fig. と記述)。Si のダイヤフラム上に拡散抵抗が形成され、圧力でダイヤフラムが歪むとその抵抗が変化する。集積化された電子回路は抵抗変化を読み出すとともに、シリコンの piezo 抵抗効果の温度依存性やばらつきを補正したりする。絶対圧力の計測にはダイヤフラムの片側に圧力基準が必要であるが、ダイヤフラムの裏側の空間を別のウェハの接合によって封止し、基準圧力室が形成される。

上述の原理は今でも変わっていないが、Bosch はより洗練された製造法を用いている[5]。図 1 (a) に示すように、まず、HF 中で Si を陽極エッチングして、不純物濃度による 2 種類のポーラス層を選択的に形成する。これを H₂ 中で高温アニーリングすると、下側のメソポーラス層は、空隙が繋がって大きなキャビティとなり、一方、表層のナノポーラス層は単結晶 Si のダイヤフラムとなる (図 1 (b))。この上にエピタキシャル Si を形成すると、真空封止された空隙 (内部の H₂ は高温プロセス中に外部に拡散する) を内部に持つ所望の厚さのダイヤフラムが形成される。エピタキシャル Si 層には、標準的な製造工程で電子回路を形成できるので、集積化圧力センサを実現できる (図 1 (c))。ダイヤフラムを形成した後は標準的な電子回路製造工程で圧力センサを製造できること、ウェハ接合を必要とせず、圧力センサを薄くできること、基本的に単結晶 Si だけでできているので、熱膨張差による変形がないことなどが特長である。

piezo 抵抗型圧力センサは、拡散抵抗のばらつきによる圧力オフセット、および piezo 抵抗効果の温度依存性のため、精度と分解能を上げることが難しいことが知られ[6]、静電容量型圧力センサが開発された (P-Fig. 36)。静電容量型圧力センサは、ダイヤフラムとそれに対向する電極との間の静電容量が、ダイヤフラムの変形によって変わることを利用する。東北大学は真空封止された圧力

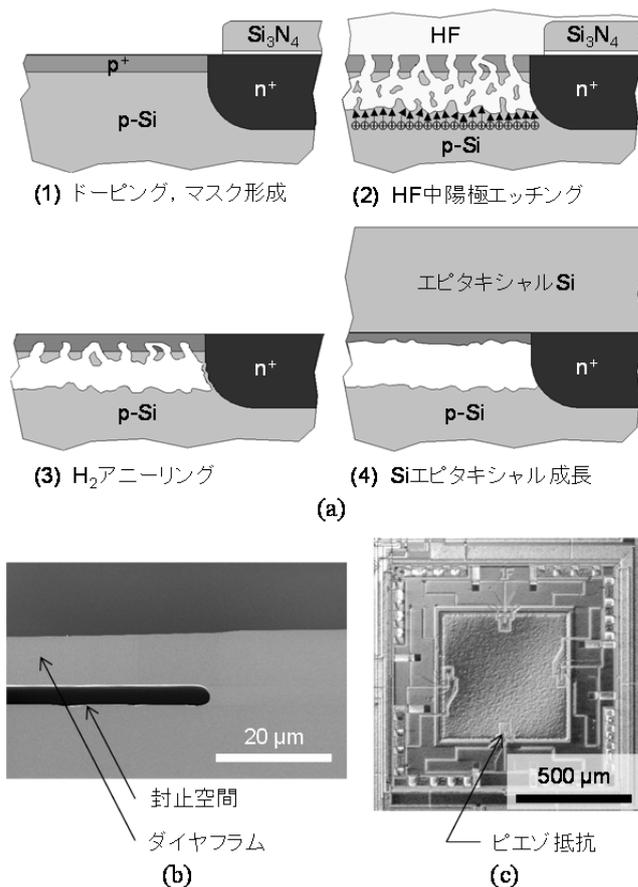


図 1 陽極エッチングと水素アニーリングによる単結晶 Si ダイヤフラムの作製法(a), (b)とその圧力センサへの応用(c) (Bosch) [5]

基準空間からの電気配線取り出し法を工夫し、図 2 に示す静電容量型集積化圧力センサ[7]を豊田工機 (現 JTEKT) と共同で実用化した。静電容量型圧力センサの理論分解能は、ダイヤフラム厚さと静電容量隙間が一定ならば、ダイヤフラムの大きさの⁻⁶乗に比例するので[6]、ある程度、ダイヤフラムを大きくすれば、高感度の真空センサも実現できる。東北大学はキャノン・アネルバと共同で、静電容量型真空センサも実用化している[8, 9]。これまでに様々な圧力センサが開発されてきたが[10]、サファイアを用いた耐熱・耐食型圧力センサ[11]、パッシブ無線 SAW (Surface Acoustic Wave) 圧力センサ[12]など、高機能化が進んでいる。

圧力センサの次に広く製品化されたのは加速度センサである。Petersen 博士の解説論文では、

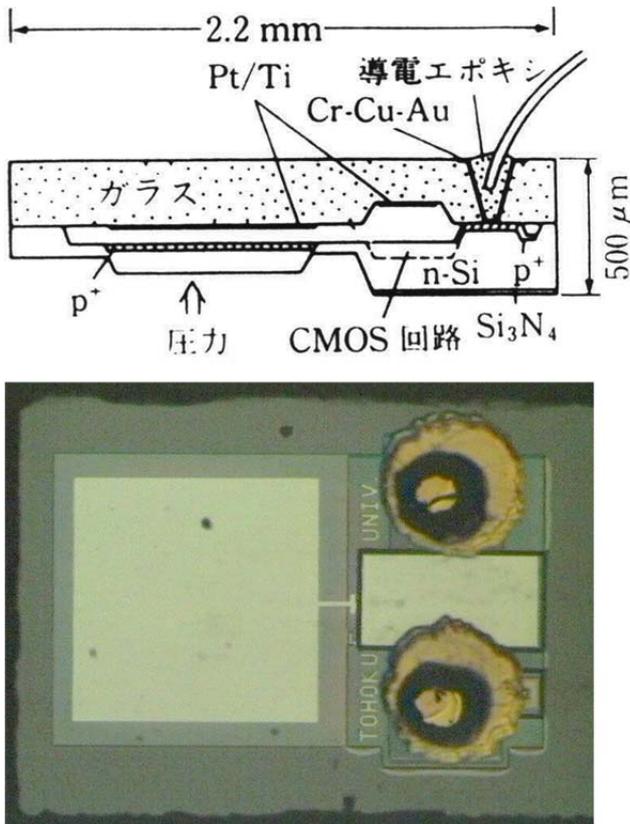


図 2 静電容量型集積化圧力センサ（東北大学）[10]

Stanford 大学開発された最初のピエゾ抵抗型加速度センサが紹介されている (P-Fig. 37)。この加速度センサは、Si の結晶異方性エッチングで加工された片持ちの錘が、加速度によって面外方向に変位するのをピエゾ抵抗効果によって検出する。この頃の設計では錘が中央で支えられていないため、検出方向以外にも感度を有する問題があるが、これを解決した静電容量型加速度センサも開発された[13]。多くの開発があった中で、一旦、市場で勝利を取めたのは、多結晶 Si の表面マイクロマシニングによる Analog Devices の静電容量型集積化加速度センサであった[14]。これは、静電容量読み出し回路を一体化することによって、数百 fF の静電容量しかない薄膜の加速度センサを実現したものである。集積化された静電容量読み出し回路は極めて高性能で、振動ジャイロでは 12 zF の静電容量変化、振動変位に直すと 1.6×10^{-4} Å の分解能が

ある[15]。この方式の問題点は、電子回路を形成したウェハに多結晶 Si のセンサ構造体を形成するため、電子回路は 1100 °C と高温で行われる多結晶 Si のアニールに耐えられなければならない、標準的な CMOS を利用できないことである。そのため、最近では静電容量読み出し回路を別チップにし、SIP (System In Package) としての STMicroelectronics の加速度センサが広く市場に受け入れられている[16]。これは、「エピ・ポリ Si」と呼ばれる 10 μm 以上と厚い膜[17]を用いた静電容量型加速度センサで、構造体が厚いため静電容量を大きくでき、その結果、静電容量読み出し回路を別チップにし、標準的な CMOS の利用によって低コスト化を図っている。

3. マイクロ流体デバイス

インクジェットプリンタ用ノズルも最も古い MEMS の 1 つである。最初に実用化されたインクジェットプリンタは連続型と呼ばれるもので、圧電振動板の振動によってノズルから吐出したインク滴に電荷を乗せ、これを電極に沿って飛行させ、その電極に電圧をかけることで不要なインク滴を紙に到達する前に曲げて間引く仕組みである。このノズルの加工に Si のバルクマイクロマシニングが用いられた (P-Fig. 15~17)。続いて、必要となるときにノズルからインクを吐出させるオンデマンド型のインクジェットプリンタが開発されたが、Petersen 博士らの圧電アクチュエータを用いた試作例が紹介されている (P-Fig. 19~21)。この試作例では、5 mm 幅のインク溜めにノズルが 1 つしかなかったが、現在では、数千個のノズルが集積化されたインクジェットヘッドが実用化され、A4 毎秒 1 枚以上といった高速のフルカラー印刷が可能になっている (たとえば, [18])。

1975 年に Stanford 大学から Si ウェハ上に形成したガスクロマトグラフィシステム (GC) が発表されている (P-Fig. 26, 27)。これにはインジェクタ、サンプリングボリューム、マイクロバルブ、TCD

(Thermal Conductivity Detector), カラムなどが集積され、現在、盛んに研究されている μ TAS (Micro Total Analysis System) の出発点となっている。このマイクロ GC の概念は、インジェクタ、サンプルリングボリューム、TCDなどを生かす形で実用化され、排気ガスなどをオンサイト分析する携帯型 GC が製品化された。その後、このようなマイクロ流体分析システムはバイオ医療分野に盛んに応用されたが、東北大学はマイクロ流路、マイクロバルブ、および ISFET (Ion-Sensitive Field Effect Transistor) を集積化した血液検査チップ (図 3) を開発した[19]。これは、東北大学が開発し、クラレと新電元が実用化した血管内 pH/pCO₂ モニタ用 ISFET センサ[20]において、血管内ではセンサを校

正できないという問題を解決するものであったが、この検査チップは使い捨てにするには高価過ぎること、利用する医師が検査結果の信頼性に責任を持っていないことなどから実用化には至らなかった。昨今、 μ TAS の研究は広がりを見せており、このようなバイオ医療検査チップについても実用化が期待されている。

4. メカニカル共振子

1965年にWestinghouseから発表された”Resonant Gate Transistor”は、表面マイクロマシニングの最初の適用例としてよく知られており、Petersen 博士の解説論文でも紹介されている (P-Fig. 44)。これは MOS トランジスタのチャンネル構造の上に、静電駆動される Au めっきの片持ち梁が形成されたデバイスである。片持ち梁の共振周波数の半分の周波数の成分を含んだ信号を入力すると、片持ち梁が共振して MOS トランジスタがその共振数で駆動されるため、高い Q 値のフィルタ兼増幅器として働く。これは革新的なアイデアであったが、当時の技術では、金属疲労による寿命の問題、および共振周波数の再現性・制御性・温度安定性の問題を克服できる目途がなく、実用上は注目されなかった。最初の金属疲労の問題は、単結晶 Si または多結晶 Si を用いることで解決できる。MEMS の構造材料として Si を使う理由の 1 つがここにある。

1980年代に UC Berkeley で多結晶 Si の表面マイクロマシニング[4]が開発され、これを用いた高い Q 値の静電駆動メカニカル共振子が多数試作されている[21]。その共振周波数は高次モードでは GHz オーダに達し、10000 以上の Q 値が得られている。この周波数領域は携帯電話に代表される移動体通信に用いられており、このようなメカニカル共振子を実用的なバンドパスフィルタに応用することが検討されている。しかし、これを用いて実用的なフィルタを構成することは難しい。メカニカル共振子の性能は、Q 値だけではなく、それと電気機械結合係数 k^2 との積 $Q \cdot k^2$ で評価しなくてはなら

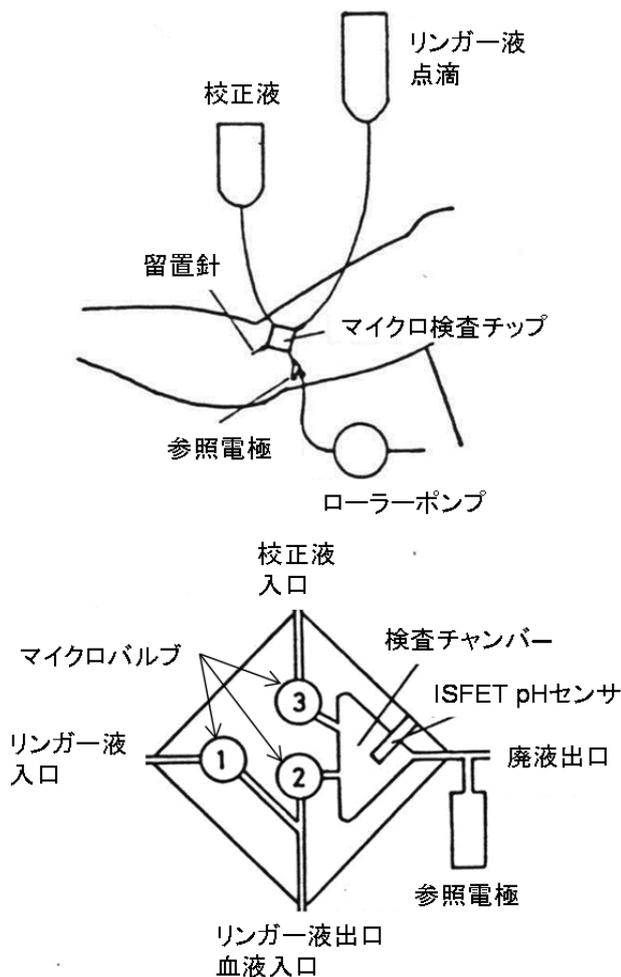


図3 マイクロ流路・マイクロバルブ・ISFET を集積化した血液検査チップ (東北大学) [19]

ないが、静電駆動メカニカル共振子では k^2 が著しく小さいからである。その結果、フィルタを構成したときに、通過/抑圧のインピーダンス比を大きくできない。実用化されたのは、AlN 圧電膜を電極で挟んだ構造の FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) を用いたフィルタである。1980 年に FBAR の最初の報告[22, 23]があつてから、Agilent Technologies (現 Avago Technologies) による実用化[24]までに約 20 年を要したが、その間、AlN の成膜技術が進歩し、理論限界を超える程の圧電性能の実現とウェハ全域で nm オーダの膜厚制御が可能になったことが大きい。

Resonant Gate Transistor では、金属疲労の問題の他に共振周波数の再現性・制御性・温度安定性の問題があつたが、MEMS 技術によるメカニカル共振子は、現在では水晶発振器に代わる周波数基準デバイスとして実用化されている[25]。これは、図 4 に示すように、高い Q の単結晶 Si の共振子をエピタキシャル成長条件で成膜した Si で真空封止[26]したもので、気密の完全性と封止空間の清浄度の高さによって、高い経時安定性を実現している。経時安定性に優れているので、周波数のプリセットと温度補償は PLL (Phase Lock Loop) 回路で実現している。ただし、PLL 回路による非連続的な周波数調整ともなうジッタが、用途によっては問題となる。

5. 光デバイス

Petersen 博士の解説論文には、光デバイスとして、まず、単結晶 Si の結晶異方性エッチングで形成される V 溝などを利用して、光ファイバ同士、光ファイバとウェハ上に形成された導波路、および光ファイバとフォトダイオードを位置決めするデバイスが紹介されている (P-Fig. 23, 24)。続いて、ねじり梁に支えられた静電駆動光スキャナが紹介されている (P-Fig. 39~43)。光スキャナの安定した共振駆動は、疲労に強い Si によって可能になる。当時、ミラーの傾き角は構造上の制約から 1° 未満

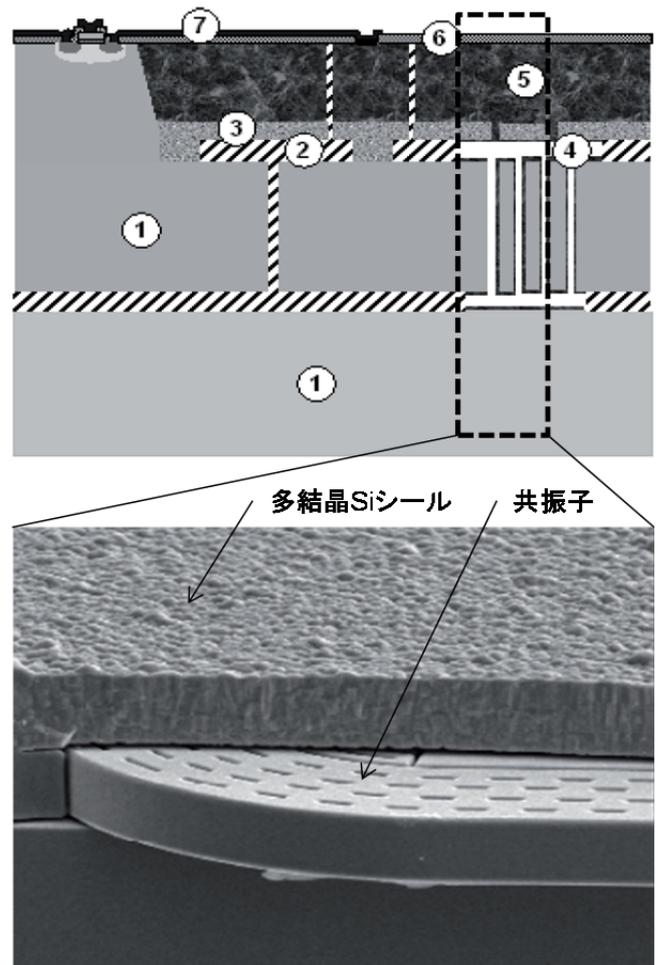


図 4 Si タイミングオシレータ (SiTime) [26]
①SOI 基板の DRIE, ②SiO₂ の堆積・パターンニング, ③エピタキシャル Si 成長・リリースホール形成, ④リリースホールからの犠牲層エッチング, ⑤エピタキシャル Si 成長による封止, ⑥CMP, ⑦表面配線や CMOS の形成

であつたが、現在では 90° 傾けられるものも報告されている。光スキャナの用途には、共焦点顕微鏡[27]、カテーテル先での OCT (Optical Coherence Tomography) (たとえば, [28])、網膜ディスプレイ (たとえば, [29])、レーザディスプレイ[30]などがある。東北大学は日本信号と共同で電磁駆動光スキャナ (図 5) を開発したが[31]、現在、これは鉄道のホームドアの障害物検知に利用されている。

Texas Instruments のマイクロミラーアレイ

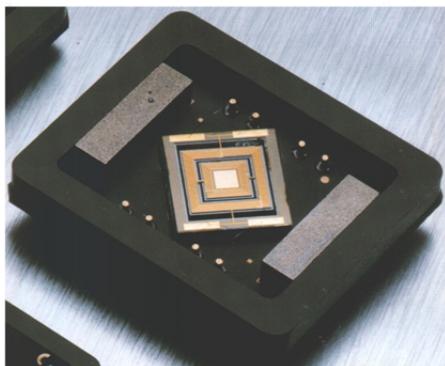
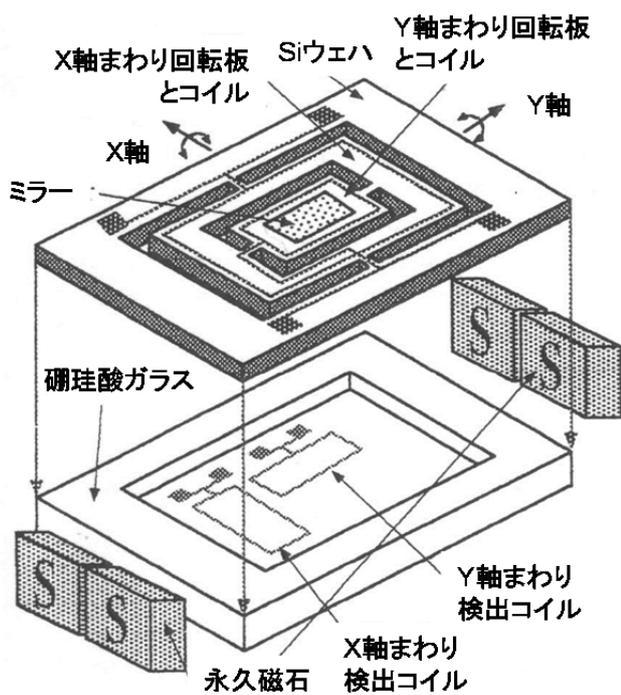


図5 電磁駆動2軸光スキャナ（日本信号）

”DMD” (Digital Micromirror Device) [32]はプロジェクトに広く用いられ、MEMSの代表例として最も知られているデバイスであろう。それに先立つデバイスとして、1975年に発表されたWestinghouseのMirror-Matrix Arrayがある (P-Fig. 45)。サファイアウェハ上にクローバ形のAl/SiO₂製フラップ (50 μm 角) がアレイ状に形成されており、これを变形させて投影像を得る。このデバイスはビジコンの撮像面の位置に取り付けられており、フラップに電子ビームを照射し、これを2次電子放出によって正にチャージアップさせて、静電引力で变形させる。投影像を消去するときは、隣接したニュートライザから低速電子を放出し、

チャージアップを打ち消す。Mirror-Matrix Arrayは、その動作原理と構成の複雑さの割には利点が少ないこと、当時の技術では大規模アレイを欠陥なく作ることが困難であったことなどから実用化されなかったが、Petersen博士は次のように述べている。このような2次元ミラーアレイが電子回路と一体化され、マトリクス駆動が電氣的に可能になれば、いつか実用的なディスプレイができるかもしれないが、そのような大それたことを考える前に開発すべきデバイスは多い。

Petersen博士が上述のような(悲観的?)展望を述べるような時代にあって、DMDを開発したLarry J. Hornbeck博士は、現在のDMDの原型となるDeformable Micromirror Device (これもDMD)を発表した[33]。このデバイスでは、静電力で变形する樹脂製ミラーが51 μmピッチで128×128のアレイにされており、その下にアドレッシング用トランジスタも集積化されていた。これが現在のDMDに発展し、1990年に航空券印刷用のプリンタに搭載されて、一旦、実用化された後、1998年にプラスによってプロジェクトに搭載された。DMDの成功要因の1つは、ミラーの傾き角のアナログ制御を諦めて、オン/オフ制御(光をスクリーンに向かって反射するか逸らすか)にしたことにある。DMDのミラーやヒンジは、疲労に強いアモルファスTiAl合金できているが[34]、それでもクリープによって傾き角に完全な再現性がない[35]。

IMECはマイクロミラーアレイを多結晶SiGeで形成し、この問題を解決した。多結晶SiGeは450 °Cで成膜でき、その応力は組成によって制御できる上、多結晶Siに準じた優れた機械特性を有するので、標準的なCMOSの直上にMEMSを形成するのに適した材料である[36, 37]。IMECが試作したマイクロミラーアレイ(図6)は、2.2 cm×4.6 cmの巨大なダイに1100万ものミラーが集積された壮大なものであるが、紫外線マスクレス露光機の心臓部として開発された[38]。このように、25年前には気の遠くなるようなデバイスが実現され、

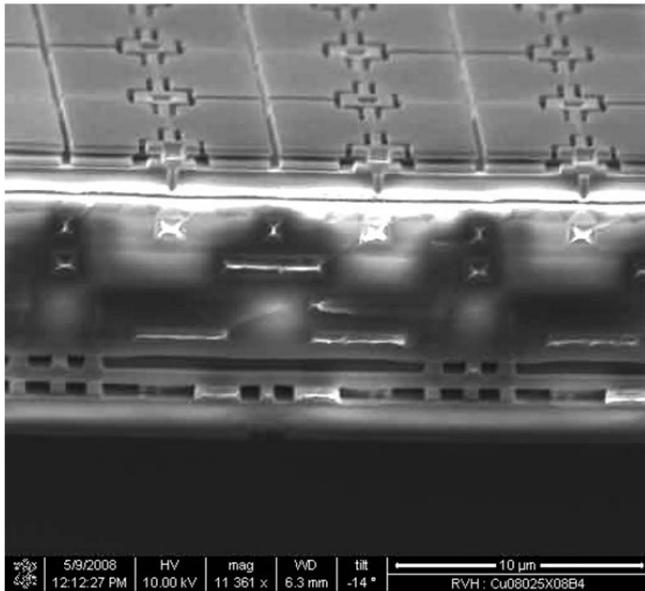


図 6 SiGe マイクロミラーアレイ (IMEC) [38]

MEMS 技術の進歩がわかる。

6. スイッチ

電気接点を機械的に繋いだり離したりする MEMS スイッチも 1970 年代に試作されている (P-Fig. 57~61)。MEMS スイッチは、特に 10 GHz オーダの以上の高周波に対して半導体スイッチに比べて大きなオン/オフ比を取れるため、現在でも盛んに研究されている。しかし、製品に用いられた例は少ない。その理由として、MEMS スイッチの大きな用途が必ずしも顕在化していなかったこともあるが、接点の寿命と信頼性の確保が容易でないことが大きい。MEMS で実現できるアクチュエータの発生力は概して小さいため、大きな力で接点を接触させることができない。したがって、

酸化膜を作らず、接触抵抗の小さい Au または Au 系合金が接点に用いられる。しかし、一方でこのような金属は固着しやすく、MEMS で実現できるアクチュエータの小さな復元力では、接点を離脱させられないことがある。特に電流を流したままオン/オフにするホットスイッチングでは、オフ時に接点で放電が起こり、接点の損傷や固着が発生しやすい。

これらの問題を回避するには、アクチュエータを工夫することも重要であるが(たとえば, [39]), 接点が汚染されたり酸化されたりしないように、MEMS スイッチを清浄な環境に真空/気密封止することが重要である。東北大学は、貫通配線付きガラスウエハ[40]の陽極接合によって真空封止された高周波 MEMS スイッチ (図 7) を開発し[41], アドバンテストはこれを LSI テスタ用に実用化した[42]。陽極接合はデガスできる適度な温度 (400 °C 程度) で、汚染源となりうる接合層を用いず、しかも歩留まりよく MEMS を真空/気密封止できる。貫通配線付きガラス基板は気密封止された空間から信頼性よく電気配線を取り出すのに便利である。しかし、低コストに貫通配線付きガラスウエハを作製できないことが、製品への適用にとって障害である。実用化されている貫通配線付きガラス基板には、ガラスウエハに機械加工で 1 つずつ貫通穴を加工し、そこにコパールの細線を銀ろう付けし、表面を研磨して作製されるものもある。

最近、東北大学とニッコーは共同で、貫通配線付きガラスウエハに代わる陽極接合可能な LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) 基板 (図 8) を開発した[43]。従来からあるグリーンシートのパンチング、スクリーン印刷、積層、焼結、および表面研磨の工程で、貫通配線はもちろん、内部配線や受動素子を LTCC 基板内に作製できる。この LTCC 基板による真空封止の高い信頼性は実証済みであり、MEMS の真空封止法の切り札として応用が広がっている。

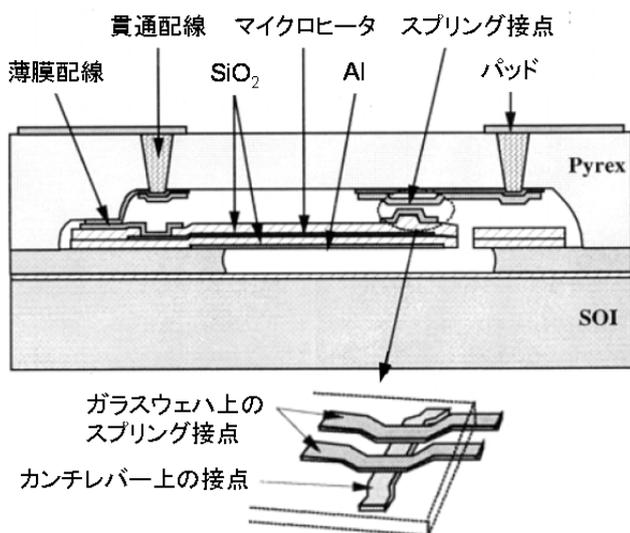
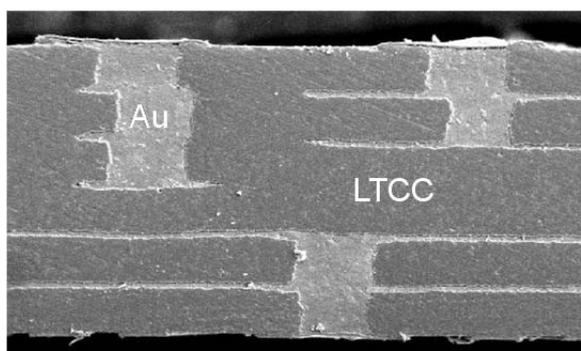
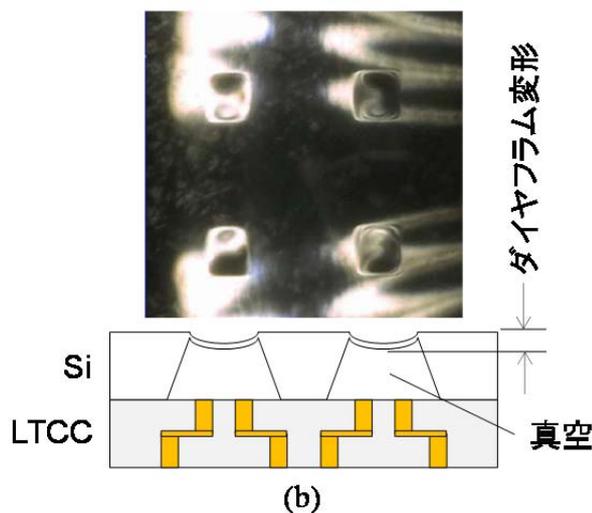


図 7 貫通配線付きガラスウェハで真空封止された高周波 MEMS スイッチ (東北大学) [41]



(a)



(b)

図 8 陽極接合できる LTCC 基板 (ニッコー, 東北大学) (a)断面, (b)真空封止した様子

7. おわりに

本稿では、1982 年に出版された Petersen 博士の解説論文を出発点にして、現在までの MEMS 技術の発展を駆け足で振り返った。過去から現在がわかったとして、次に気になるのは未来であろう。これまでの成功例に学べば、MEMS の研究開発の成功には、具体的なニーズ、あるいはそれを用いることによる具体的な効能を明らかにし、要求機能や制約条件を満足する解を探すことが重要である。難しいことに、ニーズや効能はしばしば月並みではない。たとえば、最近の成功例の 1 つであるシリコンマイクロフォンは、従来のエレクトレットマイクロフォンが熱に弱いため、半田リフローでその他の部品と一緒にプリント基板に実装できないという問題を解決してみせた。本稿でも紹介したアドバンテストの高周波 MEMS スイッチは、直流から 10 GHz までの広い周波数範囲で使えることに加えて、従来、用いられていた半導体スイッチが ESD (Electrostatic Discharge) で壊れるという問題を解決してみせた。MEMS の黎明期から約 40 年を経て様々な技術が成熟し、これからは「何のために何を作るか」が益々重要になるとと思われる。

参考文献

- [1] Kurt E. Petersen, *Proc. IEEE*, 50 (5), 420–457 (1982).
- [2] F. Laermer, A. Schilp, German Pat. DE 4 241 045 (1994), U.S. Pat. 5 501 893 (1996).
- [3] H. V. Jansen, M. J. de Boer, S. Unnikrishnan, M. C. Louwerse, M. C. Elwenspoek, *J. Micromech. Microeng.*, 19, 033001 (2009).
- [4] James M. Bustillo, Roger T. Howe, Richard S. Muller, *Proc. IEEE*, 86 (8), 1552–1574 (1998).
- [5] S. Armbruster, F. Schäfer, G. Lammel, H. Artmann, C. Schelling, H. Benzell, S. Finkbeiner, F. Lärmer, P. Ruther, O. Paul, The 12th International Conference on Solid State Sensors,

- Actuators and Microsystems (Transducers '03), 246–249 (Boston, Massachusetts, USA, June 8–12, 2003).
- [6] Hin-Leung Chau, Kensall D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-34 (4), 850–858 (1987).
- [7] 松本佳宣, 江刺正喜, 電子情報通信学会論文誌, C-2 (8), 451–461 (1992).
- [8] Haruzo Miyashita, Masayoshi Esashi, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 18 (6), 2692–2697 (2000).
- [9] 宮下治三, 北村恭志, アネルバ技報, 11, 37–40 (2005).
- [10] Masayoshi Esashi, Susumu Sugiyama, Kyoichi Ikeda, Yuelin Wang, Haruzo Miyashita, *Proc. IEEE*, 86 (8), 1627–1639 (1998).
- [11] T. Ishihara, M. Sekine, Y. Ishikura, S. Kimura, H. Harada, M. Nagata, T. Masuda, The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '05), 503–506 (Seoul, Korea, June 5–9, 2005).
- [12] Shuhei Hashimoto, Jan H. Kuypers, Shuji Tanaka, Masayoshi Esashi, *IEEJ Trans. SM*, 128 (5), 230–234 (2008).
- [13] S. Suzuki, S. Tuchitani, K. Sato, S. Ueno, Y. Yokota, M. Sato, M. Esashi, *Sens. Actuators A*, 21 (1-3), 316–319 (1990).
- [14] R. S. Payne, K. A. Dinsmore, Society of Automotive Engineers International Congress Exposition, 127–135 (Detroit, Michigan, USA, February 25–March 1, 1991).
- [15] John A. Geen, Steven J. Sherman, John F. Chang, Stephen R. Lewis, *J. Solid-State Circuits*, 37 (12), 1860–1866 (2002).
- [16] Benedetto Vigna, The 13th Micromachine/Nanotech Symposium (Tokyo, July 26, 2007).
- [17] M. Kirsten, B. Wenk, F. Ericson, J. Å. Schweitz, W. Riethmüller, P. Lange, *Thin Solid Films*, 259, 181–187 (1995).
- [18] <http://silverbrookresearch.com/>
- [19] S. Shoji, M. Esashi, T. Matsuo, *Sens. Actuators*, 14, 101–107 (1988).
- [20] Masayoshi Esashi, Tadayuki Matsuo, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-25, 184–192 (1978).
- [21] Clark T.-C. Nguyen, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, 54 (2), 251–270 (2007).
- [22] T. W. Grudkowski, J. F. Black, T. M. Reeder, D. E. Cullen, R. A. Wagner, *Appl. Phys. Lett.*, 37, 993–995 (1980).
- [23] K. Nakamura, H. Sasaki, H. Shimizu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20, 111–114 (1981).
- [24] Richard C. Ruby, Paul Bradley, Yury Oshmyansky, Allen Chien, John D. Larson III, 2001 IEEE Ultrasonics Symposium, 813–821 (Atlanta, Georgia, USA, October 7–10, 2001).
- [25] M. Lutz, A. Partridge, P. Gupta, N. Buchan, E. Klaassen, J. McDonald, K. Petersen, The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '07), 49–52 (Lyon, France, June 10–14, 2007).
- [26] Woo-Tae Park, Rob N. Candler, Silvia Kronmueller, Markus Lutz, Aaron Partridge, Gary Yama, Thomas W. Kenny, The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '03), 1903–1906 (Boston, Massachusetts, USA, June 8–12, 2003).
- [27] Hiroshi Miyajima, Nobuyoshi Asaoka, Toshihiko Isokawa, Masanori Ogata, Yukihiro Aoki, Masaharu Imai, Osamu Fujimori, Masahiro Katashiro, Kazuya Matsumoto, *J. Microelectromech. Syst.*, 12 (3), 243–251 (2003).
- [28] Huikai Xiea, Yingtian Pan, Gary K. Fedder, *Sens. Actuators A*, 103, 237–241 (2003).
- [29] Arda D. Yalcinkaya, Hakan Urey, Dean Brown, Tom Montague, Randy Sprague, *J. Microelectromech. Syst.*, 16 (4), 786–794 (2006).
- [30] Kishore V. Chellappan, Erdem Erden, Hakan Urey,

- Applied Optics*, 49 (25), F79–F98 (2010).
- [31] N. Asada, H. Matsuki, K. Minami, M. Esashi, *IEEE Trans. Magnetics*, 30 (6), 4647–4649 (1994).
- [32] Peter F. van Kessel, Larry J. Hornbeck, Robert E. Meier, Michael R. Douglass, *Proc. IEEE*, 86 (8) 1687–1704 (1998).
- [33] Larry J. Hornbeck, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30 (5), 539–545 (1983).
- [34] John Tregilgas, *Advanced Materials & Processes*, January, 46–49 (2005).
- [35] Andrew B. Sontheimer, IEEE 40th Annual Reliability Physics Symposium, 118–121 (Dallas, Texas, USA, 2002).
- [36] Andrea E. Franke, John. M. Heck, Tsu-Jae King, Roger T. Howe, *J. Microelectromech. Syst.*, 12 (2) 160–171 (2003).
- [37] Cristina Rusu, Sherif Sedky, Brigitte Parmentier, Agnes Verbist, Olivier Richard, Bert Brijs, Luc Geenen, Ann Witvrouw, Franz Lärmer, Frank Fischer, Silvia Kronmüller, Victor Leca, Bert Otter, *J. Microelectromech. Syst.*, 12 (6) 816–825 (2003).
- [38] Ann Witvrouw, Luc Haspelslagh, Olalla Varela Pedreira, Jeroen De Coster, Ingrid De Wolf, Harrie A. C. Tilmans, Twan Bearda, Bart Schlatmann, Mark van Bommel, Marie-Christine de Nooijer, Peter H. C. Magnée, Erik Jan Lous, Marco Hagting, John Lauria, Roel Vanneer, Bert van Driehuisen, *J. Microelectromech. Syst.*, 19 (1), 202–214 (2010).
- [39] 積知範, 増田貴弘, 宇野裕, 佐藤文彦, 今仲行一, 杉山進, 電気学会論文誌 E, 126 (2) 65–71 (2006).
- [40] Xinghua Li, Takashi Abe, Yongxun Liu, Masayoshi Esashi, *J. Microelectromech. Syst.*, 11 (6), 625–630 (2002).
- [41] Yongxun Liu, Xinghua Li, Takashi Abe, Yoichi Haga Masayoshi. Esashi, IEEE The 14th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2001), 220–223 (Interlaken, Switzerland, 2001).
- [42] 中村陽登, 高柳史一, 茂呂義明, 三瓶広和, 小野揮正貴, 江刺正喜, *Advantest Technical Report*, 22, 9–16 (2004).
- [43] 岡田厚志, 毛利護, 福士秀幸, 松崎栄, 江刺正喜, 田中秀治, 第24回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 234–235 (東京, 2010年3月10–12日).