

新機能創出にむけた集積化シリコン MEMS 技術とその応用

Technology of Integrated Silicon MEMS Devices for Novel Functions and the Applications

高尾 英邦

大平 文和

Hidekuni Takao

Fumikazu Oohira

香川大学 微細構造デバイス統合研究センター

Kagawa University, Micro-Nano Structure Device Integrated Research Center

Abstract

Silicon MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology has very attractive features such as high precision machining, very reliable mechanical properties, low-cost mass production with batch processing like LSI devices, and so on. However, in order to create/realize novel functions in a device, the most important promising feature of silicon MEMS devices is monolithic integration of functions with the properties as a semiconductor. In this paper, the features of integrated silicon MEMS devices are discussed, and some examples of actual silicon integrated MEMS sensors and actuators are introduced as functional key devices in their applications.

1. 集積化シリコン MEMS 技術

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術は、半導体集積回路と同様に設計パターンの一括転写を行うリソグラフィーや、バッチプロセスによる大量一括生産が可能な特徴を活かし、精密な構造を有する超小型の各種デバイスを低コストで実現できる可能性を秘めている。MEMS 技術で形成できる機械構造は、基本的に 2 次元パターンを立体化した疑似 3 次元構造であるが、厚さ数ミクロンの各種パネ構造、ダイヤフラム、微細孔、スリット、剛体部、支持部などである。必要に応じて、各所には電気接続のための配線や電極の形成、応力や光学特性を制御するための成膜等が施され、一括加工で集積することも可能である。ここで、形成した機械構造（デバイス）が動作時に変形を伴う場合、構造体の寸法加工精度だけでなく、マイクロデバイスを形成する材料の機械的特性が極めて重要となる。今日、MEMS デバイスに用いられる材料で、疲労現象等が生じない理想的特性を示すのは、集積回路の材料と同じ単結晶シリコンのみである。これは、シリコン基板が比類のない高品質結晶であり、結晶欠陥が極めて少ない（超高純度である）ことがその理由である。一方、単結晶シリコンは、集積回路の材料として理想的な電気的特性を示し、一般的な各種演算処理機能を持つ回路はもちろんのこと、MEMS センサの出力信号検出に用いる回路や、MEMS アクチュエータの駆動回路を実現することができる。

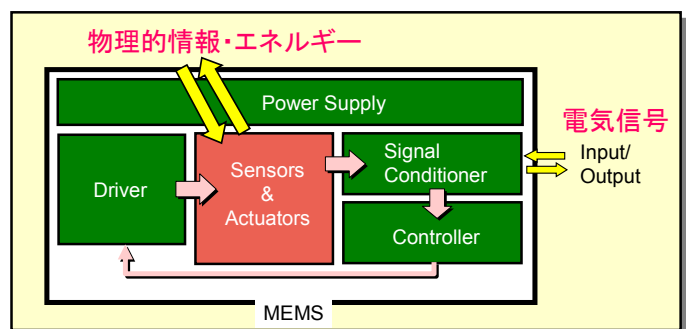
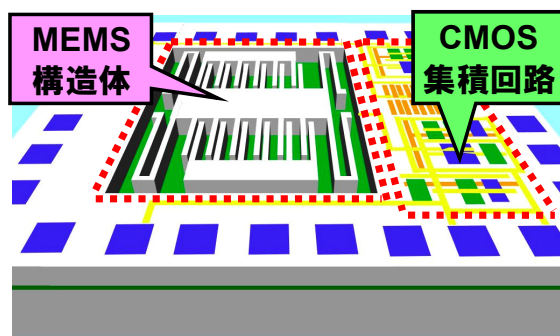


Fig.1. Structure of integrated silicon MEMS. Fig.2. Configuration of an integrated silicon MEMS.

すなわち、単結晶シリコンは MEMS デバイスを形成する材料の中で、今日、電氣的、機械的ともに

最も理想に近い性質を持っており、各種の新しい要素機能を集積化する技術開発により、様々な画期的機能を実現するデバイスを生み出す可能性に富んだ素材である。図1は、シリコンの電子材料的側面と機械材料的側面を集積回路とマイクロセンサの形として構成し、同一のシリコン上に一体集積化したデバイスの概略図である[1]。MEMS センサ部には、バネ、重りとその変位量を計測する静電容量構造が疑似3次元構造で形成されている。この容量は、近傍に形成する CMOS 集積回路で高精度に読み出され、信号電圧に変換して外部に出力される。また、静電容量は MEMS アクチュエータを駆動する静電引力を発生することができ、回路側からの電圧によって MEMS 構造体を移動させて自己診断したり、回転させたりすることが可能である。現在、集積回路の上部に回転する微小なミラー構造を形成してアレイ状に並べて制御する技術は、PC 用プロジェクタの画像を描画するキーデバイス (DMD) として米企業により実用化されている。

集積回路と MEMS を融合することで生まれる「異種機能集積化」は、それぞれ単独の技術では実現し得なかった新しい機能を実現する技術として期待が持てる。図2は、センサ、アクチュエータと集積電子回路を融合した集積化シリコン MEMS のシステムの動作を示している。このデバイスでは、光、直接力、慣性力、圧力、温度、磁界、気流など、様々な物理現象の変化に伴う物理的なエネルギーの変化を、信号として MEMS センサやアクチュエータが扱い、MEMS の信号検出や駆動制御は集積回路が担って、外部の電子システムと信号を授受する。MEMS と回路をシステムとして考えることで、双方が従来扱えなかった各種の情報に自在にアクセスできるようになるため、各種の新機能を実現できる。

2. 集積化シリコン MEMS 技術の応用事例

2.1 機能集積化触覚イメージセンサ

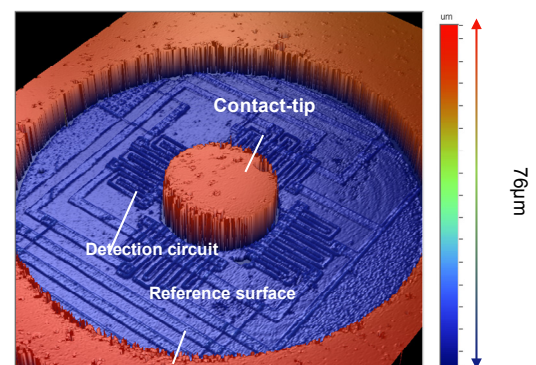
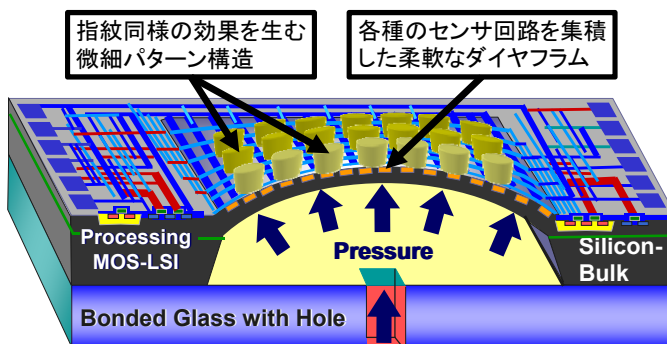


Fig.3. Concept of our multifunctional tactile imager. Fig.4. 3-D shape of a fabricated sensor pixel.

集積化シリコン MEMS 技術を用いることで、複雑な機能を統合した高精細な新機能マイクロデバイスが実現できる。我々はこの特徴を活かすべく、本技術を高性能の触覚イメージセンサに応用し、人間の皮膚感覚と同等かそれ以上の機能・性能を有する新しいセンサの実現を目指している。人間の皮膚の触覚に対応する様々な触覚センサ技術がこれまでに数多く研究開発されているが、人間の皮膚のような柔軟性を持ち、高感度・高分解能を実現している皮膚感覚センサはいまだ実現されていない。介護・福祉医療などで、人への直接的な接触やアシストを行う機械は、人間と同様の触覚機能を有している必要があると考えられる。人間の皮膚の中で特に指先の部分は、最も高い位置（空間）分解能と、入力に対する感度の高さを必要とされている。その指先皮膚と同様の触覚機能を有するセンサデバイスを実現すべく、我々は集積化シリコン MEMS 技術を用いた触覚イメージセンサの研究を行ってきた。図3は本研究が目指す機能集積化触覚センサの概略である[2]。触覚検知部は、 $10\mu\text{m}$ 程度まで薄化された1枚の単結晶シリコンダイアフラムであり、完成後に空気圧で膨らませて柔軟な接触面として機能する。ダイ

ヤフラム上には、複数の触覚情報を検知する画素回路がアレイ状に集積されており機能集積化の利点を活かした高性能な触覚検知が行えるようになっている。図4は、製作された触覚イメージセンサの1画素回路表面を3次元形状測定器で測定した結果であり、シリコン上に集積された検出回路の上に、指紋と同様の効果を生む立体構造が適切な位置に形成されている[3]。人間の皮膚触覚が力覚だけでなく振動覚や温度覚を有するように、本センサも力覚センサに加えて温度センサや指紋の働きをする微細構造物をセンサ画素回路に集積しており、指先と同様に、測定対象物の表面形状や柔らかさ、摩擦感の強弱などを同時に感じ取ることが可能である。

2.2 センサ・アクチュエータ機能を集積化したマイクロ光学デバイス

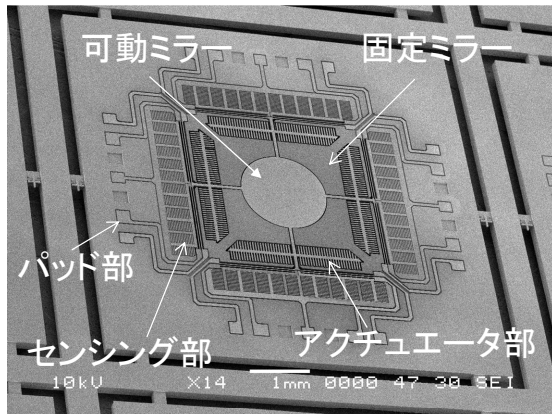


Fig.5. Phase-shift mirror for IR spectroscopy.

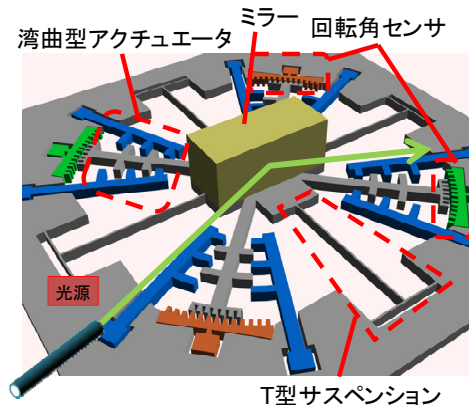


Fig.6. Rotary MEMS mirror with angle sensors.

次に、同じシリコンの MEMS 技術で可能な複数の機能を集積化したマイクロデバイスについて紹介する。材料自身の各種特性だけでなく、シリコンは数ある MEMS デバイス形成材料のなかで最も加工技術が進んでおり、形成される素子の寸法精度に優れている。この特徴により、可動構造を支えるサスペンションバネを極細化したり、容量電極と電極の間隔を最小化したりできるため、静電容量型センサの感度や静電駆動アクチュエータの駆動力を高めやすく、小型で高性能の各種 MEMS デバイスを実現できる。特に光学分野でのマイクロデバイスにおいては、原子レベルで平坦なシリコンウェハ表面を利用した超平坦な光学ミラーとしての利用や、高い加工精度を活かして表面にサブミクロンレベルの微細加工を施し、導波路や各種光学素子、メタマテリアル等を形成する研究が近年活発に報告されている。

我々のグループでは、シリコンが持つ高い集積化能力を活かしながら、これらの高性能センサ、アクチュエータを組み合わせたマイクロ光学デバイスの開発を進めてきた。図5は、非侵襲型医療診断のための赤外線分光イメージング応用を目指した赤外線位相シフト用マイクロミラーである[4]。デバイスの中心部に、基準となる固定ミラーと、面外方向に並行移動する可動ミラーを備えている。可動ミラーは4本の細いシリコンのサスペンションバネで支えられており、垂直方向に駆動する静電アクチュエータで精密に並行移動する。また、ミラーの移動量は、ミラーとともに移動する電極を利用した静電容量型センサで同時に検出され、ミラーに傾きが生じた場合はアクチュエータ駆動力のバランスで補正がかけられる構成となっている。図6は、同じくシリコンから形成された回転型マイクロミラーデバイスである。本デバイスは、シリコンチップ上に形成した溝等を用いて複数の光学部品を実装し、精密な位置決めや光軸調整を不要とする「Silicon Optical Bench (SiOB)」の技術を拡張するものである。従来の MEMS ミラーは、反射面が面外方向の光軸に対して回転するものがほとんどであり、SiOB へと集積することが不可能であった。本デバイスは扇形をした回転型静電アクチュエータを備えており、面内方向で角度を変えることができる回転ステージを有するため、SiOB との集積化が可能である[5]。ステージ

の回転方向と角度は、静電容量型ロータリーエンコーダで読み出すことができ、回転ステージの精密な回転制御を行うことができる仕組みとなっている。回転ステージ上には垂直に形成された光学部品（ミラー）が形成される。基板表面と同一面内で入射された光線方向を自在に偏向させることができることが実証されており、様々な応用開発に向けて、本デバイスのさらなる研究開発を進めている。

2.3 複数機能を集積化した微小流路集積化デバイス

シリコンが持つ優れた加工精度は、可動構造を持たないデバイスにおいても優位性を示すことができる。例えば、精密なベンチュリを形成し、微量の混合物を生成したり、その気体自身に電極から放電したりすることで、微小空間での微量な化合物生成や、複数種のプラズマ光源の実現が可能となる。

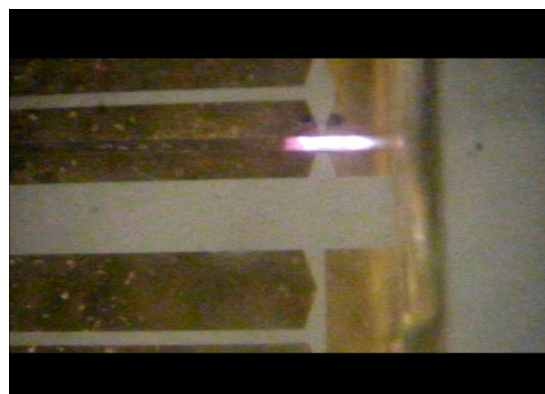
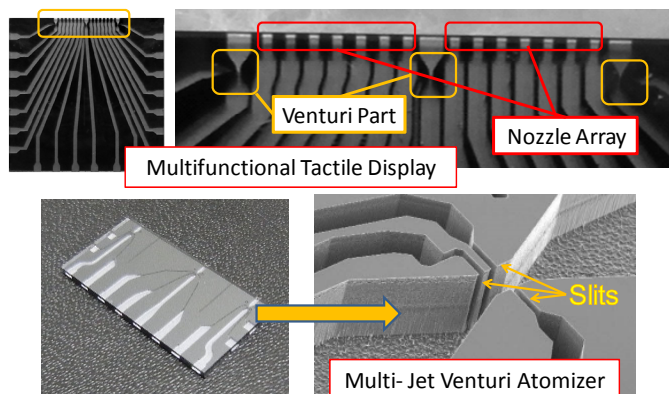


Fig.7. Microfluidic integrated device with venturi. Fig.8. Micro plasma jet generated in a channel.

図7は、シリコン微細加工を用いて形成したマイクロ流路デバイスであり、多数の流路とともにベンチュリ霧化器が集積化されている[6]。MEMSで実現できる構造は、2次元パターンを立体化した疑似3次元構造であるが、パターン設計を変えるだけで自在にあらゆる構造と機能を集積化できる。図8は、同じく微小流路内に放電電極を形成してプラズマ放電を発生させ、プラズマジェットを実現した例である[7]。微小流路内で放電させることにより、プラズマの影響を局所に限定することができる。また、複数の流路を集積し、異なる種のガスを放電させることで、複数種のプラズマを発生させることも可能である。プラズマの高い活性や微小光源としての利用についても、今後様々な応用が期待されている。

参考文献

- [1] H. Takao, T. Ichikawa, T. Nakata, K. Sawada, M. Ishida, "A Versatile Integration Technology of SOI-MEMS/CMOS Devices Using Microbridge Interconnection Structures," ASME/IEEE Journal of Microelectromechanical Systems (JMEMS), Vol. 19, No. 4, pp. 919-926, 2010.
- [2] H. Takao, H. Okada, M. Ishida, T. Suzuki, F. Oohira, "Flexible Silicon Triaxial Tactile Imager with Integrated 800 μ m-Pitch Sensor Pixel Structures on a Diaphragm," Proc. of IEEE Sensors2011 Conference, Limerick Ireland, Oct. 28-31, 2011.
- [3] Y. Maeda, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, "A Novel Integrated Tactile Image Sensor for Detection of Surface Friction and Hardness Using the Reference Plane Structure," Proc. of IEEE Sensors2012 Conference, (to be presented), Taipei, Taiwan, Oct. 28-31, 2012.
- [4] K. Oda, H. Takao, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, F. Oohira, "Vertical Comb-Drive MEMS Mirror with Sensing Function for Phase-Shift Device," Sensors and Actuators A, Vol. 181, pp. 61-69, 2012.
- [5] R. Shinozaki, F. Oohira, T. Suzuki, F. Shimokawa, and H. Takao, "Design and Fabrication of Electrostatically Driven In-Plane MEMS Rotational Mirror with Electrostatic Rotary Encoder," Proc. of 2012 International Conference on Optical MEMS & Nanophotonics, pp. 107-108, Canada, Aug. 6-9, 2012.
- [6] M. Arai, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimokawa, F. Oohira, and H. Takao, "Air-Flow Based Multifunctional Tactile Display Device with Multi-Jet Integrated Micro Venturi Nozzle Array," Proceedings of IEEE MEMS2012, pp. 148-151, Paris France, Jan. 29th-Feb. 2nd, 2012.
- [7] 山崎秀貴, 寺尾京平, 鈴木 孝明, 下川房男, 高尾 英邦, "MEMS技術を用いた微細大気圧プラズマアレイデバイスの製作," 平成24年度電気学会全国大会講演論文集, No. 3, p. 175, 2012.