マイクロマシン/MEMS*

Micromachine/MEMS

江刺正喜**
Masayoshi ESASHI

1. 経 緯

1960年代初めに、半導体のピエゾ抵抗効果を用いたシリコンダイアフラム圧力センサが、ハネウェル社（米）¹⁾、およびトヨタ中央研究所で開発された。これは排気ガス規制の動きとともに、1980年ごろから自動車のエンジン制御に用いられ、最近では家電や医療など身の回りで大量に使われている。1967年にはウェスチングハウス社（米）で共振ゲートトランジスタと呼ばれる機械的共振子を集積回路チップ上に製作する研究なども発表されている²⁾。

1970年ごろから米国のスタンフォード大学を中心に、半導体微細加工技術を応用した「マイクロマシニング」による各種センサなどの研究が開始された。

1980年代の後半には、シリコンチップ上に製作した化学分析装置、あるいは容量検出回路を集積化した容量型センサなどが発表されるようになった³⁾。シリコンチップ上の静電モータが、米国のカリフォルニア大学バークレー校から報告され、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれるようになった。日本では機械のプロジェクタとしての、極限作業ロボットの大プロが終了し、後継としてマイクロマシンの大プロが1990年に開始された。

1990年ごろから、自動車にエアバッグが装備されて、その衝突検出のためにMEMS加速度センサが使われはじめた⁴⁾。現在ではそれがゲーム機のユーザインターフェース、あるいはノートパソコンの落下を検出してハードディスクを保護する目的などに広く使われている。またこのころから、インクを吐出するノズルやその駆動回路を多数配列した、インクジェットプリンタ用ヘッドにMEMSが使われるようになった。1993年にテキサスインスツルメンツ社（米）から、反射鏡とそれを駆動する回路を100万個ほど集積化し、チップ上の鏡が高速に動いて光を反射させる、DMD (Digital Micromirror Device) を用いたビデオ

オプロジェクタが市販され、これは現在大量に使われている⁵⁾。

2000年に入ると自動車のスピンを検出するヨーレートセンサとして、MEMS振動ジャイロが運動制御に関わる安全装備に用いられるようになった⁶⁾。この振動ジャイロは現在、カメラの手振れ防止にも不可欠になっている。このころから情報・通信関係にMEMSが使われることが多くなり、MEMSマイクロフォンが従来のエレクトレットマイクロフォンに置き換わるようになり、またFBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) によるフィルタ、あるいは水晶振動子の代わりになる時間・周波数源としてのマイクロ機械共振子などが使われている⁷⁾。

製造・検査・安全などへの応用では数が少なくても付加価値が高いものが多く、LSI検査用のプローブカードをはじめ、LSIテストに使われるMEMSスイッチ⁸⁾、走査プローブ顕微鏡用の探針、あるいは赤外線を吸収することによる温度上昇を各画素で検出する熱型赤外線イメージャなどにMEMSが使われている。

医学・バイオ関係では、カテーテルや内視鏡のような小形医療機器、あるいは成分分析などに用いられる。病院で使われる場合には信頼性が、ヘルスケア関係では使い捨てのため低コストが、また創業など研究開発用では高機能が要求される。

2. 現 状

MEMSは半導体微細加工を発展させて、チップ上に回路だけでなくセンサや微細構造体およびアクチュエータなどの多様な要素を製作する技術である。マスクパターンを光で一括転写するフォトリソグラフィに加えて、深くエッチングしたり界面で接合したりする立体的微細加工が用いられる。小形だけでなく、高感度や高速応答、さらには多数配列したり回路と一体化したりする集積化を生かし、小さくても複雑で付加価値の高い部品が作られ、システムの鍵を握る部分に用いられている。またウェハ上に一括で多数作られるため、量産効果で安く供給できる。

図1はトキメック(株)で開発された静電浮上回転ジャイロである⁹⁾。直径1.5mmのシリコンリングが高速デジタル制御で静電浮上して毎分74000回転し、2軸の角速度と3軸の加速度を高精度に同時検出するセンサであり、ナビゲーション用の慣性計測システムとして市販されている。浮上させることで軸受けの摩擦や磨耗などの問題を解決することができるが、このように進歩したエレクトロニ

*原稿受付 平成20年6月25日

**正会員 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)

江刺正喜

1976年東北大学博士課程修了。同年より同工学部助手、1981年助教授、1990年より教授となり現在 (原子分子材料科学高等研究機構、(兼)マイクロ・ナノマシニング研究教育センター長) に至る。工学博士。マイクロマシニングとMEMSの研究に従事。

図1 静電浮上回転ジャイロ

図2 光空間変調器を用いたレーザー描画装置

クスを利用する利点は大きい。

最新の LSI では、コストに占めるマスク代の割合が大きく、最小寸法が 65 nm の LSI 用のマスクで 2 億円以上かかるといわれている。多品種少量あるいは開発期間の短縮などの目的で、レーザーや電子線を用いた高速の描画装置が必要とされている。スウェーデンのマイクロニックレーザー社では、DMD と同様に 100 万個ほどの可動鏡と駆動回路を配列した光空間変調器を用いた、図 2 に示すようなレーザー描画装置を市販している¹⁰⁾。これはエキシマレーザー光を光空間変調器で反射させて、1/160 で縮小投影し描画するもので、30 億円ほどの装置に用いられている付加価値の高い部品である。

3. 今後の展望

半導体集積回路は微細化を追求しながら大きく発展して

きたが、量産性を生かしても肥大化した設備投資を回収するのは困難になってきており、欧米や台湾などでは早くから集積回路に多様な要素を導入して付加価値を上げる方向に進めてきた。

MEMS は多様で標準化が難しく、品種ごとに開発することになるが、年 13% ほどで堅実に成長している。今後は携帯機器に取り付ける光スキャナによるレーザーディスプレイ、安全・保全のためのワイヤレスセンサなど、幅広く展開していくものと予想される。

わが国では携帯電話などに多くの企業が参入しているが世界的なシェアは少ない。その関係での部品供給基地として、かつては大きなシェアをもっていたが、部品の集積化が進むとともにシェアが低下し、現在では 25% ほどに落ち込んだ。今後はさらにフロントエンドチップで、高周波回路上に多数の機械共振子やスイッチのような MEMS を作ることが要求されている。これには微細 CMOS を壊さないようにして、ばねとして優れた材料による MEMS を製作する技術を開発していかなければならない。このような場合に、微細 CMOS の試作には費用がかかるので、乗り合いウェハで開発費を少なくする努力なども必要となる¹¹⁾。応用に近い MEMS のような分野では、大学といえども論文のための研究や奇をてらった研究でなく、産業に結び付く研究をしないと、産業界ではネタ不足のため複数の会社で同じ製品を作り競争し合うことになる。

参考文献

- 1) O.N. Tufte, P.W. Phapman and D. Long : Silicon Diffused-element Piezoresistive Diaphragms, J. of Applied Physics, **33** (1962) 3322-3327.
- 2) H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.T. Wickstrom and J.R. Davis Jr. : The Resonant Gate Transistor, IEEE Trans. on Electron Devices, **ED-14** (1967) 117-133.
- 3) T. Kudoh, S. Shoji and M. Esashi : An Integrated Miniature Capacitive Pressure Sensor, Sensors and Actuators A, **29** (1991) 185-193.
- 4) M.W. Judy : Evolution of Integrated Inertial MEMS Technology, Solid-State Sensors, Actuator and Microsystems Workshop, (2004) 27-32.
- 5) P.F. Van Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier and M.R. Douglass : A MEMS-based Projection Display, Proc. of the IEEE, **86** (1998) 1687-1704.
- 6) M. Nagao et al. : A Silicon Micromachined Gyroscope and Accelerometer for Vehicle Stability Control System, 2004 SAE World Congress, 01-1113 (2004).
- 7) 江刺正喜, J. McDonald and A. Partridge : 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, **923** (2006) 125-134.
- 8) 中村陽登, 高柳史一, 茂呂義明, 三瓶広和, 小野澤正貴, 江刺正喜 : RF MEMS スイッチの開発, Advantest Technical Report, **22** (2004) 9-16.
- 9) T. Murakoshi et al. : Electrostatically Levitated Ring-shaped Rotational-gyro/accelerometer, Jpn. J. Appl. Phys., **42**, Part1 (2003) 2468-2472.
- 10) P. Durr et al. : Characterization of Spatial Light Modulators for Micro Lithography, Proc. of SPIE, **4985** (2003) 211-221.
- 11) 江刺正喜 : MEMS コラボレーション, SEMI News, **23**, 6 (2007) 22-23.