MEMS とナノテクノロジー

江刺 正喜・小野 崇人*

東北大学未来科学技術共同研究センター ☎ 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

*東北大学大学院工学研究科 ☎ 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

(2004 年 8 月 19 日受理)

MEMS and Nanotechnology

Masayoshi ESASHI and Takahito ONO*

New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, 6-6-01 Aza Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

*Department of Nanomechanics, Tohoku University, 6-6-01 Aza Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579

(Received August 19, 2004)

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) enables the fabrication of value-added system devices on silicon chips. Micromachining that is an extended integrated circuit technology is used for the fabrication. A rotational gyroscope with an electrostatically levitated ring rotor was developed for inertia sensing. Wafer level packaging enabled MEMS relay for LSI tester. Multi-probe data storage and multicolumn electron beam lithography are realized by array MEMS which take advantages of photolithography and nanostructures such as carbon nanotubes formed in them. Microprobes and microresonators provide high sensitivity and spatial resolution by utilizing nanostructures.

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) を用いると、半導体微細加工を発展させたマイクロマシニング技術によりシリコンチップ上などに高付加価値のシステムデバイスを作ることができる。光・電気・機械・材料などのさまざまな技術で製作し、IT・自動車・医療・製造検査など広い分野で使われる。フォトリソグラフィを用いウェハ上に組み立てた状態で多数個作製できるため、大量に使われる場合は低コストでの供給が可能になる。2 節で紹介する静電浮上回転ジャイロのように、小形でありながらセンサ・アクチュエータなどを持つ高度なシステムを実現できる。3 節の MEMS リレーのように、ウェハレベルで接合することにより、小形で信頼性の高いデバイスができる。4 節で述べるアレイ MEMS は、フォトリソグラフィの利点を活かした配列構造である。これにはカーボンナノチューブなどのナノ構造を形成し用いている。この他、後で述べるような、ナノメートルオーダの構造を利用すること

により極端に小さくした超高感度センサを製作する場合などにも MEMS は有効である。

2. 静電浮上回転ジャイロ (小形で高度なシステム)

静電容量で重りの位置を検出し、電圧を印加して静電引力を発生させ、重りを浮上させた状態に保つことができる。これを用いた静電浮上型高速回転ジャイロが実現されている ((株) トキメックとの共同研究)¹⁾。Fig. 1 のように厚さ 150 μm 、幅 300 μm で直径 4 mm のシリコンリングのロータをパイレックスガラスで挟み、上下 1.5 μm 横 5 μm の間隔で、高速デジタル制御により静電浮上させ、ロータを毎分 1 万 2 千回転させている。この回転ジャイロの製作では、シリコンをガラスに陽極接合した後、フッ素イオンによる反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching : RIE) でシリコンを垂直加工した。そして、最後にロータの上のガラスを陽極接合した。駆動電圧は 15 V 以下と小さいため、制御用集積回路で直接駆動できる。ロータ浮上により摩擦や磨耗はないなどの特徴を備え、信頼性が高い MEMS 構造である。回転軸に垂直な 2 軸まわりの回転と同時に 3 方向の加速度成

E-mail: esashi@cc.mech.tohoku.ac.jp

(a)

(b)

Fig. 1. Electrostatically levitated rotational gyroscope. (a) Principle. (b) Photograph.

分が検出できる。ジャイロや加速度センサとして、それぞれ 0.05 deg/s と 0.7 mG の高い精度を持ち、運動制御あるいは移動機械のナビゲーションなどに使用できる。

3. MEMS リレー（ウェハレベルパッケージング）

通電加熱によって動くバイメタル構造で接点を導通させる，Fig. 2 の高周波用 MEMS リレーを製作した²⁾。以下に述べるウェハレベルパッケージングによってチップサイズに作られており，20 GHz までの高周波信号を扱うことができた。接点はスプリング構造としてあるため，貼り付きなどもなく 10^7 回以上の動作ができ長寿命で，LSI テスタなどに使われる³⁾。スプリング構造の接点によって接触点を増やし，接点抵抗の低減をはかった。MEMS リレーでは接点に掛かる力が小さいため，接点抵抗を小さくするには表面に酸化膜などができない金を用いる必要がある。この場合に接点表面の汚れの影響を受けやすいが，接合時のガス放出などがなく気密封止できるウェハレベルパッケージングで製作されているため信頼性が高い。

ウェハレベルパッケージングでは，MEMS 構造を持つシリコンに，貫通配線を形成したガラスをウェハ段階で陽極接合してダイシング（チップへの分割）を行い，

(a)

(b)

Fig. 2. MEMS relay. (a) Structure. (b) Photograph.

チップサイズで組み立てられた状態に一括製作する⁴⁾。チップ内に壊れ易い構造を持つ場合でもダイシング時に不良を生じず，後工程としての容器（パッケージ）封入が不要で，低コストになる。

4. マルチプローブデータストレージ（アレイ MEMS）

DMD（Digital Micromirror Device）と呼ばれる，テキサスインスツルメンツ社で作られたビデオプロジェクタ用のチップでは，静電引力で動く鏡とその駆動回路が 100 万個ほど集積化されている⁵⁾。このようなアレイ構造の MEMS には駆動回路が不可欠である。しかし DMD のようなモノリシック化した言わば SOC（System On Chip）MEMS の製作は容易でない。これに対して以下の例で示すように MEMS に汎用の集積回路を接続する SIP（System In Package）MEMS も可能で，これにはガラスに高密度に形成した貫通配線が有効である。

次世代の高密度記録装置として，多数のプローブで同時に記録・読出を行うマルチプローブデータストレージを開発しており，その構造を Fig. 3 (a) に示す⁶⁾。Fig. 3 (b) に示すように，先端 30 nm のナノヒータを持つ

Fig. 3. Multiprobe data storage. (a) Principle. (b) Probe array.

プローブがガラス基板上に多数 (32×32) 配列されており、並列で高速に記録・読出を行う。それぞれのプローブから、ガラスの裏面にフリップチップボンディングした信号検出用集積回路に貫通配線を用いて接続されている。

この装置では、プローブのピッチに相当する距離 (100 μm) だけ記録媒体を2次的に動かすXYステージを必要とする。Fig. 4はこの目的で開発したモノリシックXYステージである⁷⁾。圧電材料であるPZT (チタン酸ジルコン酸鉛) のセラミック基板に、多層圧電アクチュエータとステージ・変位拡大機構が一体形成されている。ここではダイシングで形成したPZT板の溝をめっきによる金属で埋め、1つおきに電気的接続を行うことによって多層圧電アクチュエータを形成した。この後フェムト秒レーザによって切り抜いて運動機構を形成し、並進2軸と面内回転ができるステージを製作した。PZT基板の両面に多層圧電アクチュエータを形成してバイモルフのように反らせることで上下 (Z) 方向など6軸に駆動するステージに発展させることもできる。

Fig. 4. Monolithic XY stage made of PZT. (a) Photograph. (b) Principle of X motion.

DVD-RAM に使われる相変化記録媒体 (GeSbTe) への熱的記録と書込部の導電性変化を利用した電気的読出⁶⁾、またダイヤモンドプローブを用いての、強誘電体記録媒体への電気的書込と誘電率的非線形性を用いた読出に成功している (東北大学電気通信研究所 長教授およびパイオニア (株) との共同研究)⁸⁾。また Fig. 5 は導電性ポリマーであるポリアニリン薄膜に通電して記録したもので、記録部は相変化により導電性が30分の1になるため、これを電気的に読み出している⁹⁾。

電子線によって非接触で同時に記録・読出を行うマルチプローブデータストレージ、およびパターン幅が0.1 μm 以下で多品種のシステム LSI に対応する高スループットのマスクレス電子線描画装置を目指して、Fig. 6 に示すような電子源と静電レンズを並べたマルチ鏡筒電子線描画装置を開発している¹⁰⁾。電界放射電子源に引き出し用ゲート電極、および集束用静電レンズを形成し配列してある。このシステムでも、駆動用集積回路に接続するためのガラス貫通配線や、ステージを電子源の間隔だけ移動させるモノリシックXYステージが重要な役割を果たす。

Fig. 6 (a) に示す単純な静電レンズで電子を集束させ

(a)

(b)

Fig. 5. Microprobe recording on conductive polymer. (a) System. (b) Recorded pattern (conductance image).

(a)

(b)

Fig. 6. Multi electron field emitter with electrostatic lens. (a) Structure. (b) Photograph of an emitter.

Fig. 7. Stabilization of emission current after exposing the CNT emitter to hydrogen.

るためには、カーボンナノチューブ (CNT) による微細な電界放射電子源が有効である。電子源の先端部を触媒となるニッケルや鉄で形成しておき、ホットフィラメント CVD 装置内で基板に負電圧を印加することにより、カーボンナノチューブを先端部に選択的に成長させた¹¹⁾。カーボンナノチューブを用いることで、低電圧での電界放射が可能になると同時に長寿命化できる。またカーボンナノチューブ表面に水素を付けて、電界放射の仕事関数を 4.7 eV から 3.4 eV に下げ、Fig. 7 に示すように電界放射電子電流の低雑音化と安定化を達成した¹⁰⁾。

5. マイクロプローブと振動型センサ(高感度)

マイクロマシニングを用いると、薄い片持ち梁による高感度な力のセンサを実現でき、また細い先端部や狭い開口などにより高い空間分解能が得られる。これらの特長を活かし、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) や走査型近接場光顕微鏡 (Near-field Scanning Optical Microscope: NSOM) などのプローブが実用化されている。

シリコンの片持ち梁で微小ギャップのコンデンサ構造と直径 20 nm の微小開口を形成し、容量検出型 AFM と NSOM の画像を同時に観察できるプローブを製作した¹²⁾。開口が小さくなると光強度が弱まるため、Fig. 8 に示すようなポータリアンテナプローブを製作し、高解像度でも光強度を大きくして NSOM イメージングを行った¹³⁾。このプローブでは、静電アクチュエータで調節して微小間隔を形成し、金属薄膜に偏光で生じた表面プラズモンにより間隙部で光を発生させる。

厚さ 100 nm 程のシリコン片持ち梁の共振周波数変化を用いた、高感度なセンサについて研究している。共振子の Q 値が高いと、微小な振動エネルギーを蓄積したり、微小な共振周波数変化を検出でき、非常に高感度なセンサが実現できる。Fig. 9 に示すように、シリコン片

(a)

(b)

Fig. 8. Bow-tie antenna probe. (a) Principle. (b) Photograph.

Fig. 9. Dependence of Q factor of thin silicon beam resonator on beam length after treatments.

持ち梁を超高真空中 1000℃ で加熱すると表面の自然酸化膜が蒸発し、振動エネルギーの減衰が少なくなって Q 値が 25 万程にもなる¹⁴⁾。この高い Q 値を利用しカーボンナノチューブの水素吸蔵能測定などを行っている¹⁵⁾。

厚さ 50 nm のシリコン片持ち梁に直径 1.5 μm の鉄粒子を付けたもので、共振周波数変化から磁気力を高感度に検出する振動式磁気力顕微鏡 (Magnetic Resonance Force Microscope: MRFM) を製作した¹⁶⁾。細胞レベルの磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging:

MRI) を実現するのに、電磁波の周波数と磁場の強さで共鳴する場所の原子を磁気力変化として MRFM で検知し、CT の原理で画像化する研究が行われている¹⁷⁾。電磁波放射で検出する一般の MRI よりも高感度で空間分解能を上げられる可能性がある。磁気力は磁気モーメントと磁場勾配の積になるが、磁場勾配が 10⁴ T/m の場合、1 個のプロトンスピンでは磁気力が 1.4 × 10⁻²² N となる。我々の真空中常温での実験では 5 × 10¹¹ 個のプロトンを検出できる段階にあり、空間分解能として 2 μm に相当する。実用的には大気中で使うため振動子の Q 値は小さくなるが、パラメトリック機械振動によるノイズのスクイーズ効果で位相雑音を減らすなど、大気中でも高い感度を達成する試みを行っている¹⁸⁾。

6. お わ り に

MEMS を用いると高付加価値のデバイスを供給でき、生産額は年 20 % 程の割合で増大している。特に付加価値の高いシステム LSI 関連技術として今後重要である。しかし多様な技術が必要でプロセスがデバイスごとに異なり、多品種少量でありながら高額の設備を用いる。このため実用化には、効率的な研究開発体制や、相応しいビジネスモデルが求められる。またプロセス技術としても、高アスペクト比構造を低コストで作れる RIE の高速化技術、低温接合の技術、厚膜を歪なしに形成する技術、圧電材料などの機能性材料を適用する技術など、多くの課題を解決していく必要がある。

文 献

- 1) T. Murakoshi, Y. Endo, T. Fukatsu, S. Nakamura and M. Esashi: Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 2468 (2003).
- 2) Y. Liu, X. Li, T. Abe, Y. Haga and M. Esashi: Proc. MEMS' 2001, Interlaken (2001) p. 220.
- 3) 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: Advantest Technical Report **22**, 9 (2004).
- 4) M. Esashi: Microsystem Technologies **1**, 2 (1994).
- 5) P.F. Van Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier and M.R. Douglass: Proc. IEEE **86**, 1687 (1998).
- 6) D.W. Lee, T. Ono, T. Abe and M. Esashi: J. Microelectromechanical Systems **11**, 215 (2002).
- 7) D.Y. Zhang, T. Ono and M. Esashi: Digest of Technical Papers, Transducers' 03, Boston (2003) p. 1518.
- 8) H. Takahashi, T. Ono, Y. Cho and M. Esashi: Proc. IEEE MEMS' 2004, Maastricht (2004) p. 536.
- 9) T. Ono, S. Yoshida and M. Esashi: Nanotechnology **14**, 1051 (2003).
- 10) P.N. Minh, P.N. Hong, T.M. Cuong, T. Ono and M. Esashi: Proc. MEMS' 2004, Maastricht (2004) p. 430.
- 11) J.H. Bae, P.N. Minh, T. Ono and M. Esashi: J. Vac. Sci.

- Technol. B **22**, 1349 (2004).
- 12) P.N. Minh, T. Ono and M. Esashi: Appl. Phys. Lett. **75**, 4076 (1999).
 - 13) K. Iwami, T. Ono, E. Oesterschulze and M. Esashi: Proc. the 4th Asia-Pacific Int. Conf. on Near-Field Optics (APNFO-4), Hualien (2003) p. 55.
 - 14) J. Yang, T. Ono and M. Esashi: Appl. Phys. Lett. **77**, 3860 (2000).
 - 15) T. Ono, X. Li, H. Miyashita and M. Esashi: Rev. Sci. Instrum. **74**, 1240 (2003).
 - 16) T. Ono and M. Esashi: Rev. Sci. Instrum. **74**, 5141 (2003).
 - 17) O. Zuger and D. Rugar: J. Appl. Phys. **75**, 6211 (1994).
 - 18) H. Wakamatsu, T. Ono and M. Esashi: Technical Digests of 21st Sensor Symposium, Kyoto (2004) p. 285.