

## 国際会議報告

### 「IEEE MEMS 2013」



東北大学  
大学院工学研究科  
田中 秀治

#### 1. はじめに

次世代センサ, Vol. 22, No. 1 で, 昨年の IEEE MEMS (IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems) の報告をした。この会議の位置付けについてはそれを参照して欲しいが, 端的に言えば, IEEE MEMS は MEMS 分野で最も重要な国際会議の 1 つで, アカデミアが新しいアイデアとその実証結果を始めて披露する場である。ここでは, 2013 年 1 月 20~24 日に台北で開催された IEEE MEMS 2013 の発表論文の中から, 物理センサに関するものを紹介する。

その前に, 論文数などの統計データに触れておく。発表論文数は 306, アブストラクト投稿数は 776 で, パリで開催の IEEE MEMS 2012 と比べてそれぞれ 37, 198 の減少となった。採択率は約 40%であり, 例年より若干高めである。国別の論文シェアは米国 94 (投稿数 175), 日本 92 (投稿数 181), 台湾 25, 韓国 21 となっており (この順位は昨年と同じ), IEEE MEMS では米国と日本の存在感が相変わらず大きい。また, 参加者は約 560 名と発表されていた。

#### 2. ジャイロ

Yole Development によると, MEMS 売上首位の STMicroelectronics は, 2012 年, ついに MEMS の売上を 10 億ドルの大台に乗せた。前年比約 10%の伸びである。その 70%以上を慣性センサが稼いでいると言われており, 慣性センサの重要性は益々高まっている。一方, 最近 1 年で慣性センサの単価は 20~30%も下落したようで, 前述の売上増は販売数が 50%以上伸びたことによる。このことから, 既存の慣性センサは既に成熟しきったとも言える。

前述の IEEE MEMS の位置付けからして, この会

議で慣性センサはもはや主役であるとは言えない。それどころか, ジャイロは MEMS の代表選手であるにもかかわらず, 「MEMS ジャイロはよくわからない」という人は, IEEE MEMS の参加者の中でも多数派になりつつあるかもしれない。しかし, ここでは MEMS ジャイロの新しい技術を取り上げる。

一口にジャイロと言っても, ランダムウォークにして  $0.01^\circ/\text{s}^{1/2}$  程度のものから  $0.001^\circ/\text{h}^{1/2}$  以下の航空宇宙用まで幅広い。MEMS 振動ジャイロはローエンドに位置するが, より高性能なものを MEMS によって小さく安く実現できれば, 新たな応用が拓ける可能性がある。成功例の 1 つは, 東京計器の静電浮上リングロータジャイロ (<http://www.tokyo-keiki.co.jp/sensor/j/products/mesag.html>) であり,  $0.1^\circ/\text{h}^{1/2}$  オーダの性能を実現している。これは, 直径 1.5 mm の Si リングを静電力で浮上させ, 数万 rpm 以上で回転させることによって, 3 方向の加速度と 2 方向の角速度を同時に計測でき, 現在, 鉄道の乗り心地を改善するための列車動揺測定装置として実用化されている。

[1] QUADRATURE FM GYROSCOPE, M. H. Kline<sup>1</sup>, Y.-C. Yeh<sup>1</sup>, B. Eminoglu<sup>1</sup>, H. Najjar<sup>2</sup>, M. Daneman<sup>3</sup>, D. A. Horsley<sup>2</sup>, B. E. Boser<sup>1</sup>, <sup>1</sup>UC Berkeley, <sup>2</sup>UC Davis, <sup>3</sup>Invensense, pp. 604-608, 087-We

この論文では, 従来の振動ジャイロとは異なる新しい方式の MEMS ジャイロ “Quadrature FM Gyroscope” が報告されている。図 1 に示すように, 空中に浮かんだ物体が角速度  $\omega_s$  で回っているとき, それと同じ方向に角速度  $\Omega$  で回っている観測者から見れば, その物体の角速度は  $(\omega_s - \Omega)$  に見える。ここで  $\omega_s$  が既知であれば, 観測者は  $(\omega_s - \Omega)$  を測れば,

$\Omega$ を知ることができる。しかし、実際には $\omega_s$ を正確に知ることは難しいので、角速度 $-\omega_s$ で逆方向に回る別の物体を用意し、観測者は $(-\omega_s - \Omega)$ を測り、前者と和を取って $\Omega$ を知る。これがこのジャイロの原理である。右回りの物体と左回りの物体の角速度を一致させるには、音叉型振動ジャイロのモードマッチングと同様の方法が使える。

このような原理のジャイロを MEMS で実現するために、上記「物体」として直径 1 mm の Si リングが使われている。図 2 に示すように、リングの周りには容量電極が配置されており、静電駆動によってリング上を波（ワイングラス変形モード形状）が周回する。この MEMS 構造と CMOS 読み出し回路

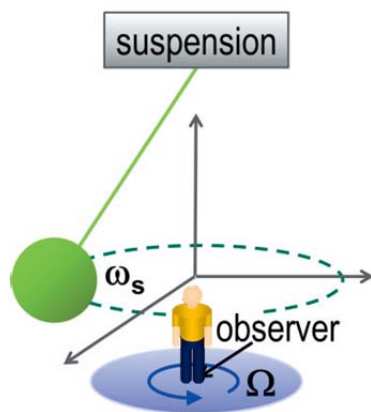


図 1 Quadrature FM Gyroscope の原理 (論文[1]から引用, 一部改変)

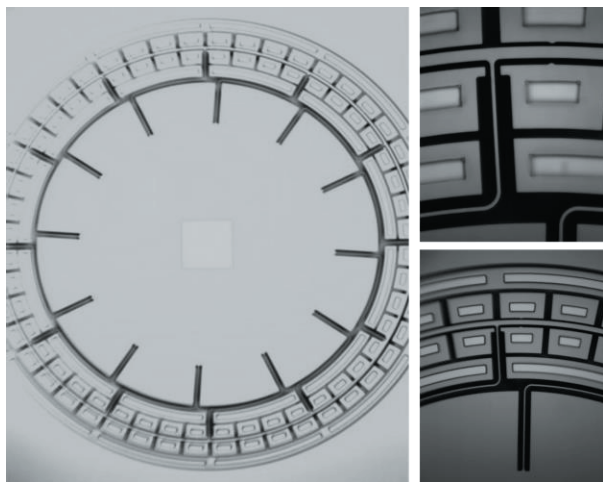


図 2 Quadrature FM Gyroscope の構造 (論文[1]から引用); InvenSense の“Nasiri Fabrication Process”によって作製されている。

とは、InvenSense のジャイロと同じプロセス “Nasiri Fabrication Process” (<http://www.invensense.com/mems/technology.html>) によって集積化されている。なお、Yole Development によると、2011 年、InvenSense の携帯電話等向けジャイロ単体のシェアは約 22%で、約 78%の STMicroelectronics に続いている (両者を合わせとシェア 100%)。InvenSense はファブレス・ベンチャー企業であるが、このような企業が活躍できるところに米国の強さがあるように思う。

さて、このジャイロは、上記原理からわかるように、バンド幅に制限がなく、したがって、バンド幅を犠牲にせずに精度を上げられる。また、周波数出力でそれと入力角速度とは常に一定の線形な関係にある。また、振動ジャイロのように微小な変位を検出する必要がないので、消費電力を下げることもできる。現在は、上記「物体」が細いリングで質量が小さいことから、性能は振動ジャイロ並みであるが、高性能化の余地は大きい。

[2] FABRICATION AND TESTING OF HEMISPHERICAL MEMS WINEGLASS RESONATORS, P. Pai, F. K. Chowdhury, H. Pourzand, M. Tabib-Azar, University of Utah, pp. 677-680, 105-Mo

[3] HIGH-Q FUSED SILICA BIRDBATH AND HEMISPHERICAL 3-D RESONATORS MADE BY BLOW TORCH MOLDING, J. Cho, J. Yan, J. A. Gregory, H. Eberhart, R. L. Peterson, K. Najafi, University of Michigan, pp. 177-180, 8-4

[4] EFFECT OF THICKNESS ANISOTROPY ON DEGENERATE MODES IN OXIDE MICRO HEMISPHERICAL SHELL RESONATORS, L. D. Sorenson, P. Shao, F. Ayazi, Georgia Institute of Technology, pp. 169-172, 8-2

これら 3 つの論文は、Hemispherical Resonator Gyroscope (HRG) を MEMS によって超小形化する研究に関するものである。図 3 に論文[2]から引用した構造を示す。3 次元的なワイングラス、つまり本物のワイングラスと同じような形は、取手のところで 1 点支持するので、振動損失が少なく、つまり Q 値が高く、また、その振動モードは外部からの加速度・ショックにあまり影響を受けない。このような性質を利用したジャイロが HRG であり、航空宇宙用

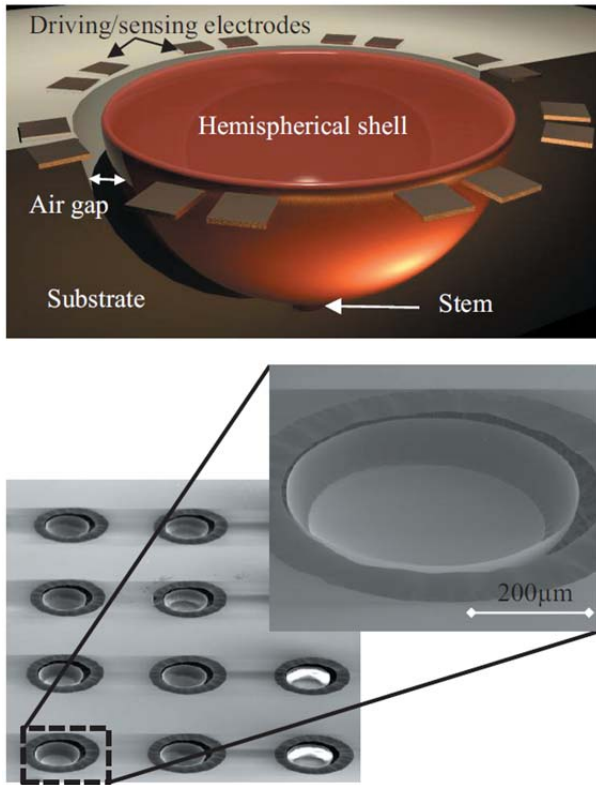


図3 Hemispherical Resonator GyroscopeのためのMEMS ワイングラス共振子（論文[2]から引用）

として Northrop Grumman によって実用化されている。その性能は、ランダムウォークにして単体で  $0.0006^\circ/h^{1/2}$ 、4 つ組み合わせたシステムで  $0.00006^\circ/h^{1/2}$  と、1970 年代に Rockwell International によって原子力潜水艦用に開発された Electrically-Suspended Gyroscope (ESG) のそれに匹敵する。価格は 100 万ドルとも言われている。アプローチは異なるものの、同じ目的の研究が、突然、複数発表されたのは、米国で HRG を超小形化する DARPA の“MRIG Program”が始まったからであり、10 もの大学・研究機関がこれに参加しているようである。

3 次元的なワイングラス共振子を作るために、Si 基板に半球状の穴をエッチングして、そこに共振子材料を成膜してリリースしたり、ガラス吹きの要領で石英を小さく丸く膨らませたりといった手法が採られている。ワイングラス形状が完全に対称であれば、ワイングラス振動のモードは縮退して周波数応答に 1 つのピークしか現れないが、対称性が崩れば、ピークがスプリットする。これはジャイロの高性能化のためには、できる限り小さくなくてはなら

ないが、わずかな加工誤差や膜厚分布でも生じるため（たとえば、理想的半球に  $10 \mu\text{m}^3$  の  $\text{SiO}_2$  を付加すると、22 kHz の共振周波数が 5 Hz スプリットする）、高度な加工技術が求められる。

### 3. 圧力センサ

半導体技術による圧力センサは最も古い MEMS の 1 つであり、MEMS という言葉が生まれるずっと前、1970 年代からある。そして、圧力センサは、現在でも MEMS の売上全体のうち最も大きな割合を占めているが、その重要性は益々高まっていくと思われる。これは、今後、気圧センサが携帯電話等に搭載され、高さ方向の位置情報サービスに利用されるためである。典型的には、何階にいるかを認識して、建物内の案内サービスが提供される。なお、1 Pa の気圧差は約 8 cm の高低差に相当する。ここでは、圧力センサに関する 2 つの論文を紹介する。

[5] RESONANT PRESSURE SENSOR WITH ON-CHIP TEMPERATURE AND STRAIN SENSORS FOR ERROR CORRECTION, C.-F. Chiang<sup>1</sup>, A. B. Graham<sup>2</sup>, B. J. Lee<sup>1</sup>, C. H. Ahn<sup>1</sup>, E. J. Ng<sup>1</sup>, G. J. O'Brien<sup>2</sup>, T. W. Kenny<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Stanford University, <sup>2</sup>Research and Technology Center Robert Bosch, pp. 45-48, 3A-5

MEMS クロック発振器を実用化した SiTime は、最近、最も急成長を遂げた半導体企業と言われている。その技術的成功の鍵は、Robert Bosch と Stanford 大学の Kenny 教授とによるエピポリ Si を用いた共振子の埋め込み封止技術にある。この技術によると、クリーンな封止空間を高い信頼性で実現できるため、共振周波数の経時変化を極めて小さくできる。また、共振子の作製から封止まで、ウェハ接合や両面パターンニングなしに、基本的に薄膜堆積とエッチングによって実現でき、しかも、ウェハプロセス終了後は標準的な樹脂モールドによる最終パッケージングが可能である。このため、水晶発振器と比べて大量生産によるコスト低減効果が大きく、低価格品でのコスト競争力が高い。

この論文では、上述の共振子埋め込み封止技術を適用した共振型圧力センサが報告されている。なお、同技術を適用したバルク振動ジャイロも同じグループから報告された (pp. 625-628, 092-Th)。共振型圧

力センサは、圧力によってダイヤフラム（共振子のパッケージングと共通）が歪むと共振周波数が変化する原理を用いている。一般的に、周波数の読み出しは、微小な容量変化や電圧変化の読み出しより容易である。この共振型圧力センサの大きな特徴は、図4に示すように静電共振子が3つ備えられていることで、1つは圧力測定用、1つは温度補正用（圧力に感じないように片持ち支持）、最後の1つはパッケージング・実装歪の補正用（ダイヤフラムから外れて位置）となっている。

ところで、共振型圧力センサは、横河電機で後に東京農工大学の教授となられた池田先生が中心になって1980年代に開発され、“DPharp”という商品名で実用化されている。実はこの共振式圧力センサの共振子の封止方法も、SiTimeのMEMSクロック共振子のそれとコンセプトを同じくするところがある。池田先生らの論文は、当然、この論文で最初に引用されている。

[6] ON-CHIP INTEGRATED PS3 (PACKAGING-STRESS SUPPRESSED SUSPENSION) FOR THERMAL-STRESS FRESS PACKAGE OF PRESSURE SENSORS, J. Wang, L. Yang, X. Li, Shanghai Institute of Microsystem and Information, pp. 49-52, 3A-6

この論文では、よく考えられたピエゾ抵抗型圧力センサが報告されている。その構造を図5に示すが、全体的には、ダイヤフラムのある感圧部が片持ち梁状に支持された構造である。これは、圧力センサが外部からの応力、主にパッケージング・実装時の応力に影響されないようにするためであり、論文[5]と同じ問題認識に基づいている。

この構造を作製するのに、まず、(111)Siウエハに細い溝を加工し、そこから基板内部をアルカリエッチャントでアンダーエッチングして空洞を作り、前述の細い溝をポリシリコンで塞いでダイヤフラムが形成される。さらに、同様の方法で細い溝からウエハ内部をアンダーエッチングし、感圧部を支持する片持ち梁構造が形成される。つまり、この圧力センサもウエハ接合や両面パターニングなしに作製でき、CMOSファンドリの標準的なプロセスと親和性が高い。また、この圧力センサは1mm角を大きく下回

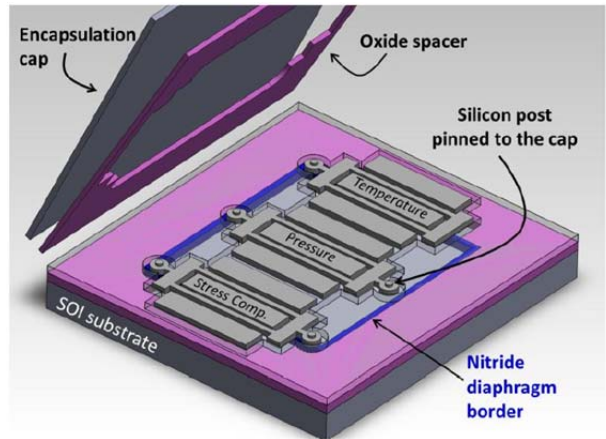


図4 エピタリSiによって封止された共振型圧力センサの構造（論文[5]から引用）

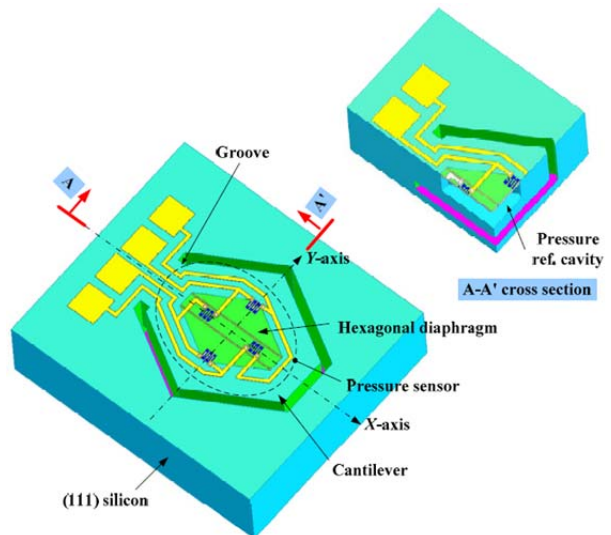


図5 感圧部が片持ち梁状に支持されたピエゾ抵抗型圧力センサ（論文[6]から引用）

る大きさで、センサ主要部は500μm四方程度の大きさである。

従来、典型的な圧力センサの構造は、Siウエハにダイヤフラムを形成し、その背面をガラスウエハ等の接合によって封止したものであった。この構造は、ウエハ接合や両面パターニングが必要で製造コストがかかる上、2層構造で低背化に限界がある。そこで、現在、Robert Boschの圧力センサもSTMicroelectronicsのそれもウエハ片面からの加工のみで作製できる構造である。Robert Boschは、陽極化成したポーラスSiを水素アニールし、さらにその上にSiをエピタキシャル成長して、ダイヤフラムを

形成している (Lammel *et al.*, Transducers '07, pp. 35-36)。STMicroelectronics の“VENSENS Process”も似たようなアイデアを利用している (EP 1 577 656 B1)。この論文の圧力センサは、陽極化成や水素アニールといった特殊プロセスを利用しない点でより簡単であるとも言える。

#### 4. 赤外線センサ

最近、省エネルギーと安全への意識の高まりによって、赤外線センサと赤外線イメージャへのニーズが急速に高まっている。立命館大学の木股先生が開催されている「赤外線アレイフォーラム」(第4回目を2013年8月2日に開催)には、主に企業から200名を超える参加者が集まるという。実際に、赤外線センサまたは赤外線イメージャを開発している企業は多く、かく言う著者も複数の赤外線センサの研究開発に関わっている。そこで、IEEE MEMS 2013で発表された赤外線デバイス関連の研究を3件、紹介する。

[7] MEMS SENSOR ARRAY PLATFORM INTEGRATED WITH CMOS BASED OPTICAL READOUT, R. B. Erarslan<sup>1</sup>, S. Z. Lulec<sup>1</sup>, U. Adiyani<sup>1</sup>, S. Olcer<sup>1</sup>, Y. Temiz<sup>2</sup>, Y. Leblebici<sup>2</sup>, H. Torun<sup>3</sup>, H. Urey<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Koç University, <sup>2</sup>EPFL, <sup>3</sup>Boğaziçi University, pp. 181-184, 9A-1

Koç 大学 (トルコ) の Urey 先生は、Microvision で光スキャナの開発を担当していた光 MEMS の専門家である。彼のアイデアは、バイメタル構造の赤外線受光部の変形を光で読み出そうというものである。最も一般的な非冷却型赤外線イメージャはボロメータ方式であり、VO<sub>x</sub> の温度変化による抵抗変化を電氣的に読み出す。しかし、この方式では、読み出し用集積回路上にボロメータアレイを加工せねばならない上、また、ボロメータへの配線による熱損失、および電流による発熱が問題となる。

これまでもバイメタル構造を用いた光読み出し方式の赤外線イメージャの研究はあった (たとえば、Ishizuya *et al.*, IEEE MEMS 2002, pp. 578-581)。光読み出し方式の大きな利点は、集積回路上にボロメータアレイを作製する必要がなく、読み出しに一般的な CCD または CMOS カメラが利用できることである

が、一方、赤外線と可視光の2つの光学系が必要になり、システムがかさばりがちである。この論文では、図6に示すように、照明用貫通穴を追加した CMOS フォトディテクタアレイを MEMS バイメタル構造の裏に取り付けて、小形化を図っている。

[8] INFRARED-TO-VISIBLE TRANSDUCER USING TEMPERATURE SENSITIVE EU(TTA)<sub>3</sub> ON SELF-SUSPENDED THIN FILM FOR INEXPENSIVE THERMAL IMAGING DEVICE, T. Tsukamoto, M. Esashi, S. Tanaka, Tohoku University, pp. 421-424, 040-Th

これは我々の論文であるが、Eu(TTA)<sub>3</sub> を含む感温塗料を用いて、赤外線を可視光に変換するトランスデューサに関するものである。これも前述の光読み出す方式と同様の利点を享受できる。感温塗料は、紫外線 (λ = 337 nm) で励起したとき、可視域の燐光 (λ = 612 nm) を発するが、温度が上がると熱的失活によって消光するため、我々の測定によると -2.3% / K の感度で発光強度が下がる。感温塗料をパリレンで形成された熱絶縁構造上に担持し、波長 355 nm の紫外線 LED でパルス的に励起して、赤外線の検出を

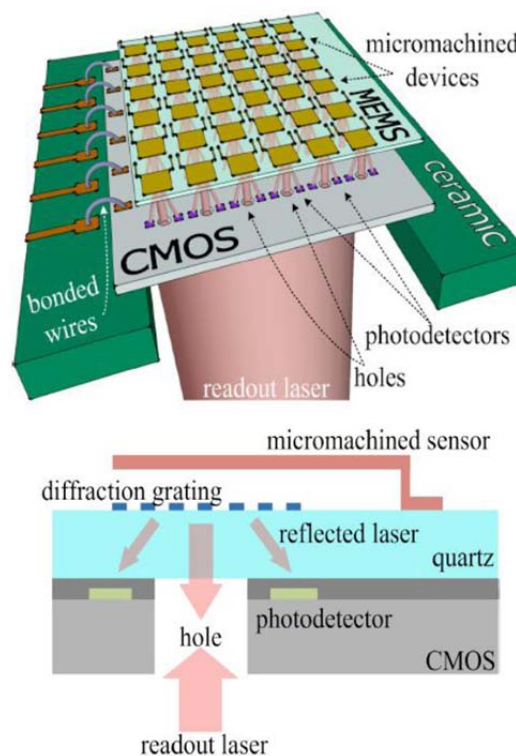


図6 光読み出し方式の赤外線センサアレイ (論文 [7]から引用)

実証した。将来的には、図 7 に示すようなシステムに発展させる。

[9] SUB-10 NANOMETER UNCOOLED PLATINUM BOLOMETERS VIA PLASMA ENHANCED ATOMIC LAYER DEPOSITION, F. Purkl<sup>1,2</sup>, T. English<sup>3</sup>, G. Yama<sup>2</sup>, J. Provine<sup>3</sup>, A. K. Samarao<sup>2</sup>, A. Feyh<sup>2</sup>, G. O'Brien<sup>2</sup>, O. Ambacher<sup>2</sup>, R. T. Howe<sup>3</sup>, T. W. Kenny<sup>3</sup>, <sup>1</sup>University of Freiburg, <sup>2</sup>Research and Technology Center, Robert Bosch, <sup>3</sup>Stanford University, pp. 185-188, 9A-2

3 つ目の論文は、ALD (atomic layer deposition) によって成膜した極薄 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (厚さ 10 nm 以下) を用いたボロメータ (図 8) に関するものである。これは Pt の抵抗率の温度依存性を用いたボロメータであるが、非常に薄くすると、金属でもボロメータからの熱伝導損失が小さくなるので感度を高くでき、また、熱容量も小さくなるので応答性もよくできる。極薄構造への赤外線の吸収は、よく知られているファブリー・ペロー共振器を用いることで、高効率に行える。また、Pt の ALD は 300°C 程度で行えるので、読み出し集積回路上へのボロメータの作製には熱的余裕がある。

最近、ALD を利用した MEMS が増えている。これには、半導体回路への ALD の適用が進み、市販の ALD 装置が容易に入手できるようになったことが大きい。ALD によると、ピンホール無しの極薄膜を複雑な MEMS 構造に均一厚さで形成できるので、今まで不可能であったプロセスが可能になる。我々は、数年かけて自作の複合 ALD 装置を開発し、MEMS の作製に利用している。IEEE MEMS 2013 でも、それを用いた横型 PZT アクチュエータを報告した (pp. 197-200, 9A-5)。

## 5. おわりに

今回の IEEE MEMS 2013 の報告では、物理センサに的を絞って 9 つの論文を紹介した。MEMS センサのビジネスでは、欧州の STMicroelectronics と Robert Bosch が 2 強であり、本文でも触れたが、米国では InvenSense, SiTime などのファブレス・ベンチャー企業が新しい MEMS を実用化し、大きな成功を収めている。センサは様々な人間活動を効率化することに利用できるもので、我が国が目標にかかげる「グリ

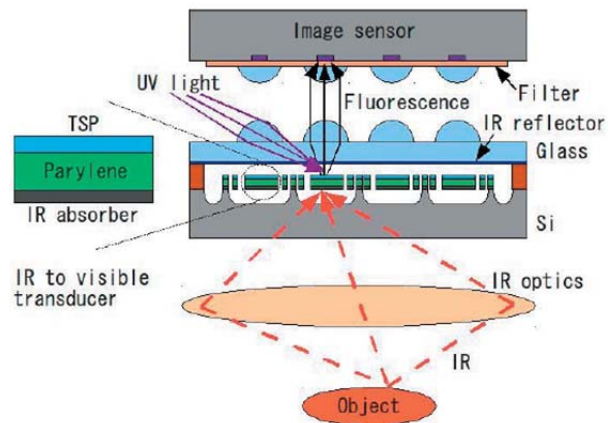


図 7 感温塗料を用いた光読み出し方式の赤外線イメージャの構成 (論文[8]から引用)

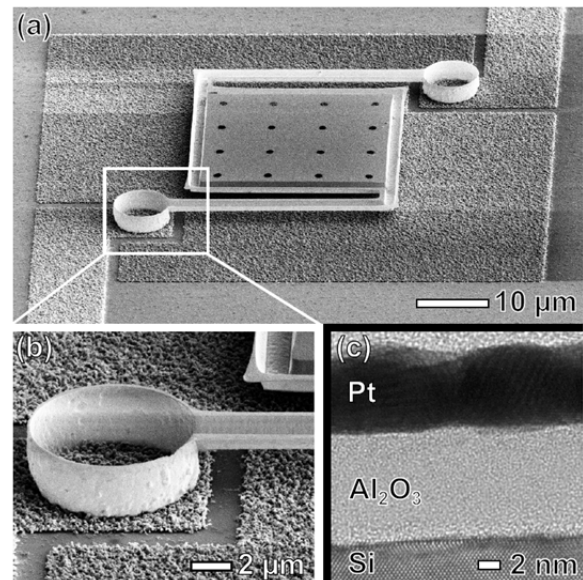


図 8 ALD によって成膜した極薄 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いたボロメータ (論文[9]から引用)

ーンイノベーション」に通じるものである。我々も負けてられない。

次回の IEEE MEMS は 2014 年 1 月 26 日から米国サンフランシスコで開催される。チェアは Georgia 工科大学の Farrokh Ayazi 先生と California 大学 Los Angeles 校の "CJ" Kim 先生が務められる。アブストラクトの投稿締切は 9 月 10 日である。