

車載 MEMS センサ用機能性材料膜の形成

神保武人*¹・露木達朗*²・小林宏樹*^{1,2}

Manufacturing Technology of Functional Material Films for Automotive MEMS Sensor

Takehito JIMBO*¹, Tatsuro TSUYUKI*² and Hiroki KOBAYASHI*^{1,2}

*¹Institute of Semiconductor and Electronics Technologies, ULVAC, Inc., 1220-1 Suyama, Susono, Shizuoka 410-1231, Japan

*²Advanced Electronics Equipment Division, ULVAC, Inc., 2500 Hagisono, Chigasaki, Kanagawa 253-8543, Japan

In this chapter, the MEMS sensor for automotive application and related functional material films, whose deposition technologies we develop, will be described.

Performance of automobile was improved by the control system, enabling lower fuel consumption, higher safety and so on. MEMS sensor is essential for controlling systems as it can detect environmental changes and feedback the information to the system. Importance of automotive MEMS sensor is getting higher for the realization of a next-generation automobile such as an autonomous car, electric vehicle and so on. Realization of the MEMS sensor with a new function is expected by applying a variety of functional materials. More specifically, functional material films, PZT and VO_x films which are developed by authors are introduced. Both films are deposited by the sputtering method and films with excellent performances can be obtained by unique sputtering and process technologies.

1. はじめに

世界の自動車産業は2.3兆ドル規模(2017年)であり、今後、年平均成長率2.7%ほどで成長が続くとみられている。その中で、車載エレクトロニクスは、年平均成長率7%の1420億ドル規模、そのうち車載センサは同13%の110億ドル規模と見られており^{1,2)}、車載センサの期待値が大きいことが伺える。

自動車の進化を支えるものに制御システムの高性能化が挙げられる。制御システムにより、低燃費、低エミッション、安全性、快適性、利便性などが実現、付加されてきた。制御システムはElectronic Control Unit (ECU)、センサ、アクチュエータで構成され、センサは自動車の環境面、安全面における制御に不可欠な役割を果たしている。センサの搭載数は年々増えており、車種によるが100個を超えるセンサが搭載されているとのことである^{3,4)}。

センサ自体も変化してきており、従来はメカニカル式のものが主流であったが、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術が使われるようになり、高精度に計測できるようになった³⁾。MEMSは、マイクロメートル単位の微小な機械部品やセンサ、電子回路などを組み合わせた複合的な電子部品であり、微細加工技術により基板上に作り込んで製造する⁵⁾。

これにより、小型でありながら、高性能で高信頼性のセンサの作製が可能となり、また、様々な改良によって高温等の過酷環境下でも使用可能なセンサが実用化されてきた⁶⁾。

車載センサとしては、圧力、Tire Pressure Monitoring System (タイヤ空気圧監視システム, TPMS)、化学、慣性、磁気、超音波、画像、レーダー、Light Detection and Ranging / Laser Imaging Detection and Ranging (LiDAR)⁷⁾などのMEMSおよびアクティブセンサなどが中心となっている。自動車メーカーはモビリティ社会の発展と地球環境維持を両立するため、自動運転車および電気自動車 (Electric Vehicle, EV)⁸⁾などの次世代自動車の技術開発を積極的に行っている⁹⁾。運転の自動化は、カメラ、レーザー、LiDARなどのイメージングおよび検出センサの開発を促進し、電動化は蓄電池管理のための電流センサと熱センサの開発を促進する。中でも、イメージング、レーザーおよびLiDARのような高付加価値のセンサモジュールの統合化に向けた試みが急拡大している¹⁰⁾。

2. 車載 MEMS センサの応用製品

本項では車載 MEMS センサを応用した最新の自動車技術について、いくつかの事例を紹介する。

2.1 LiDAR^{11,12)}

LiDARは、光を使って物体検知や対象物までの距離を計測するものである。レーザー光を照射し、それが

*¹(株)アルバック 半導体電子技術研究所(〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-1)

*²(株)アルバック 電子機器事業部(〒253-8543 神奈川県茅ヶ崎市萩園2500)

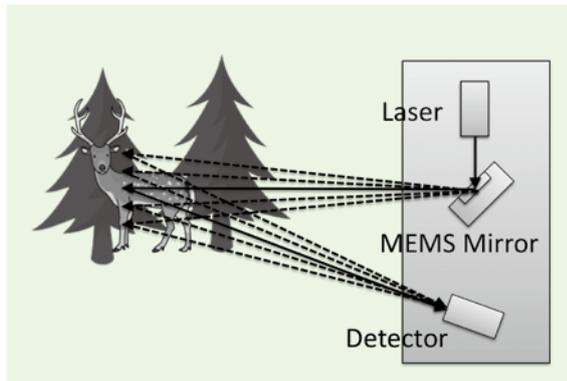


Fig.1 Schematic drawing of LiDAR and its operation. LiDAR is mainly composed of Laser, MEMS mirror and detector. Piezo-MEMS is used because of the demand for a smaller and high-performance system.

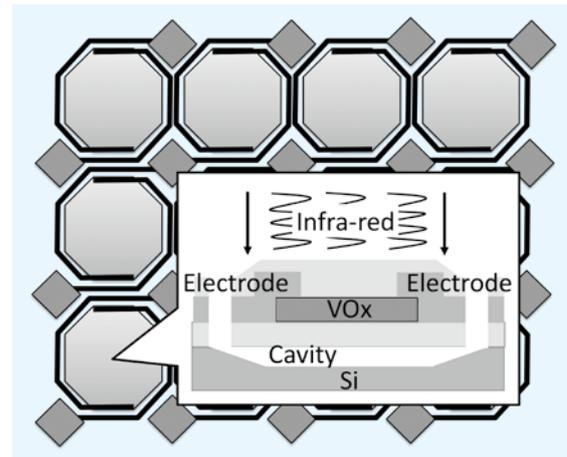


Fig.2 Schematic drawing of uncooled infrared bolometer array. Vanadium oxide has attracted attention for realizing of higher performance system.

物体に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測し、物体までの距離や方向を測定できる。3次元(3D)観測が可能で、電波よりもはるかに精密に、物体の存在する角度や形状を検知できる。

Fig.1に示すように、LiDARは、レーザー光源とレーザー光を走査するためのMEMSミラーから成り立っている。このMEMSミラーには、小型化と高性能化への要求から圧電MEMS技術が使われている。圧電材料であるチタン酸ジルコン酸鉛($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, PZT)は、他の材料と比較して、同じ電圧を印加させた時に大きな振動を発生させることができるため、駆動するための機能性膜として採用されている。

2.2 Head-up display ^{13, 14)}

Head-up display (HUD)は、情報を液晶パネルなどに表示し、それをミラーに反射させて、虚像としてフロントウィンドウに映し出すというものである。HUDを応用した拡張現実ナビゲーション(Augmented Reality -, AR-)は、車外前方の交通状況の光景を仮想情報(拡張)で補完することができるため、運転の安全性を高めることができる。ドライバーは、安全に運転するために必要な情報を目の前のディスプレイから得られるため、ドライバーの気が散ったり知覚に過度な負荷がかかったりするのを防ぐ役割を果たしている。

本デバイスにおいても、LiDARと同様に、レーザー光を走査するため、MEMSミラーが用いられている。

2.3 Intelligent Headlight ¹⁵⁾

Intelligent Headlightは、基本性能としては自動車の前照灯(ヘッドライト)の機能を持つ。Intelligent Headlightが従来の前照灯と異なる点は、外部の情報を得るためのセンサ(カメラやレーダー、LiDAR)と連携し、対向車を避けて光を照射できたり、障害物(動物など)に焦点を当てて照射したりすることができることである。

本デバイスもLiDARやHead-up display同様に、レーザー光を走査するために、MEMSミラーが用いられている。

2.4 Night Vision ^{16, 17)}

Night Visionは暗視装置と同義であり、赤外線やマイクロ波など、可視光線範囲外の電磁波により暗闇の中の物を見る撮像装置である。赤外線センサ(Infra-red -, IR-)は、Night vision, すなわち、暗い夜中での可視化を実現するため重要なセンサである。赤外線センサは、対象物の熱を感知できるため、暗い夜中でも障害物(熱源のある動物など)を可視化できる。

非冷却型赤外線ボロメータアレイ(Fig.2)は、これまで冷却赤外線光子検出器でしか可能でなかった性能レベルに達しており、サーモグラフィ、消防、運転者の暗視、セキュリティおよび監視などの用途で使用される低コストの赤外線撮像システムに適した技術となっている¹⁸⁾。従来のアモルファスシリコン(Amorphous Silicon, a-Si)を用いた技術があるが、近年、高性能化を実現するため新材料である酸化バナジ



Fig.3 Multi Chamber type Sputtering System "SME-200"™ (Advanced Electronics Equipment Division).

ウム (Vanadium Oxide, VO_x) が注目されている。VO_x は、熱により抵抗が変化する。その抵抗変化が大きく、直線性が高いため、従来のアモルファスシリコンを用いた赤外線センサに比べてノイズを低減することができる¹⁹⁾。

3. 車載 MEMS センサ用機能性材料膜の形成技術

本項では車載 MEMS センサの製造に寄与する当社の技術、中でも筆者らが手掛ける機能性酸化物膜の形成技術及びそれら材料膜の性能について述べる。

3.1 圧電 MEMS 用 PZT 膜の形成^{20,21)}

2 項で言及したように、LiDAR 等に应用されている MEMS ミラーでは圧電 MEMS 技術が使われている。低い駆動電圧で大きな駆動力を得るため、高い圧電定数を持つこと、過酷環境下での長期信頼性を有する PZT 膜が求められている。

筆者らは PZT 膜をスパッタリング法によって形成している。成膜装置として、同膜の形成に最適化された専用のスパッタリングモジュールを備えたマルチチャンバ型スパッタリング装置「SME-200」™(電子機器事業部) (Fig.3) を用いている。PZT セラミックターゲット (マテリアル事業部) を用いて RF マグネトロンスパッタリング法により PZT 膜を形成している。プロセスガスとしてはアルゴン (Ar) と酸素 (O₂) の混合ガスを用いている。PZT 膜の膜厚は、圧電 MEMS 用途において 0.5 ~ 3.0 μm である。基板は白金 (Pt) 薄膜を下部電極として形成した Si 基板を採用している。Pt 薄膜は (111) 優先配向であるが、バッファ層を含む PZT の成膜プロセス条件の改善により、基板温度 500℃ 以下の低温形成と c 軸、すなわち (001) 優先配向を達成している (Fig.4 (a) (b))。なお、本製法による PZT 膜は圧電性の発現のための分極処理 (ポーリング処理) を必要としない。

PZT 膜の駆動性能を示す圧電特性を測定するために、30 mm x 3 mm のカンチレバー (片持ち梁) を作

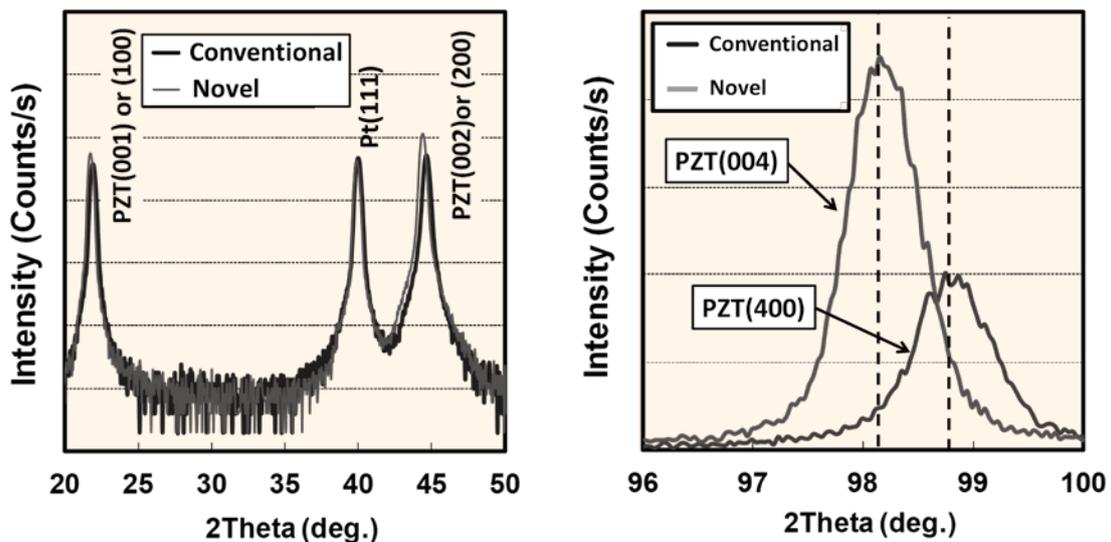


Fig.4 XRD Pattern of PZT film.

(a) a and c-axis oriented PZT films can be obtained onto Pt(111) film in both cases.

(b) c-axis oriented PZT can be obtained at substrate temperature below 500℃ by the novel process.

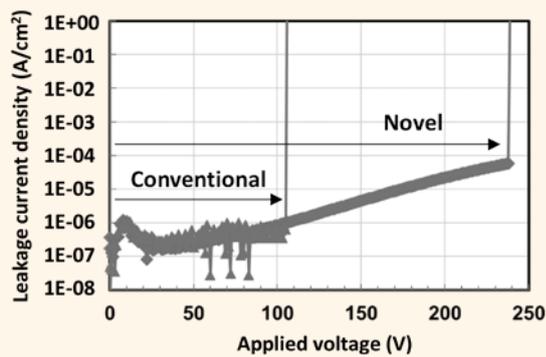


Fig.5 Improvement of dielectric breakdown strength of PZT film.

製した。レーザードップラー振動計とレーザ干渉計を用いて分極と変位を同時に観察した。カンチレバーの変位を確認することで PZT 膜の圧電特性を確認した。膜厚 2.0 μm の PZT 膜において、従来法の成膜プロセスにおいても -14.7 C/m^2 と比較的大きな圧電係数 (e_{31}) を得られているが、プロセス改善により、 -15.5 C/m^2 と更に高い特性を得ることに成功している。当社の PZT 膜の特長は高い圧電特性のみならず、Fig.5 に示すように 200 V を超える高い絶縁破壊電圧 (Dielectric breakdown voltage, V_{BD})、200 万時間もの経時絶縁破壊 (Time Dependent Dielectric Breakdown, TDDB) を達成しており、そして、このような高性能な PZT 膜を 500°C 以下の成膜温度で形成できることにある。

3.2 赤外線センサ用 VOx 薄膜の形成²²⁾

非冷却赤外線センサ用の新材料として大きな抵抗温度係数 (Temperature coefficient of resistivity, TCR) を有する VOx 薄膜が注目されている。高い TCR が得られるだけでなく、温度変化を電流変化として検出するため、TCR が線形であることも特性上重要である。

VOx 薄膜は、金属バナジウムターゲット (直径 4 インチ) および Ar と O₂ の混合ガスを用いた反応性パルス DC マグネトロンスパッタリング法により形成した。基板は熱酸化膜付き Si 基板を用いた。同薄膜形成に調整された専用の斜入射カソード及び基板回転機構を搭載したスパッタリングモジュールを用いた。同モジュールを搭載するプラットフォームは 3.1 項の PZT と同じ「SME-200」™である。本モジュールでは直径 200 mm 面内で基板温度分布 $\Delta 2^\circ\text{C}$ 以下を実現する高均一性能の基板ヒータを採用している。これは、VOx 薄膜の抵抗

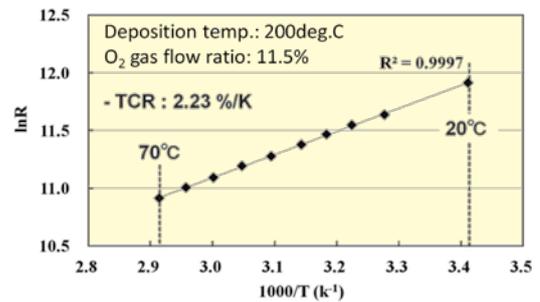


Fig.6 TCR measurement result of VOx (thickness: 50 nm)

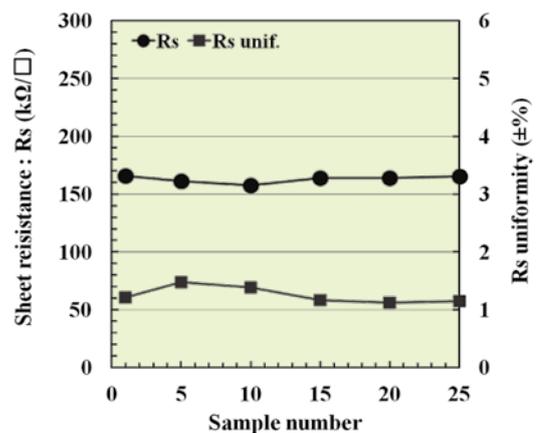


Fig.7 Film deposition reliability test by short running with 25 wafers.

値分布を目標値の $\pm 3\%$ 以内すなわち、基板温度分布を $\Delta 5^\circ\text{C}$ 以下に抑えるために必要な技術である。

作製した VOx 薄膜 (膜厚 50 nm) の TCR 測定結果を Fig.6 に示す。20°C から 70°C までサンプルを加熱しながら I-V 測定を行った。TCR の値は $-2.23\%/K$ であり、目標値 (TCR $< -2\%/K$) を達成した。測定温度範囲では相変化による抵抗値の急激な変化は検出されず、また、最小二乗法による直線回帰において、その決定係数 R^2 は $R^2=0.9997$ であり、非常に線形性に優れていることが明らかである。また、目的の膜特性が得られた成膜条件にて成膜安定性の試験を行った。Fig.7 に 25 枚連続成膜の結果を示すが、面内均一性 (49 点測定) : $\pm 2.0\%$ 以下、基板間分布 (49 点測定 6 枚) : $\pm 3.7\%$ が得られ、安定にサンプルが得られるプロセスであることが確認された。

今後の目標としては、良好な線形性、面内均一性、安定性を維持しつつ、更に高い TCR を実現することである。

4. まとめ

本章では、自動車用途として使われる MEMS センサおよび筆者らが手掛ける PZT や VOx 等の機能性材料膜関連の応用技術について述べた。

自動運転車や電気自動車など次世代自動車の実現のために、車載 MEMS センサの重要性がますます高まり、また、搭載数も更に増えていくと予想される。今回紹介した二つの材料の他にも様々な特性を有する機能性材料があり、新しい機能を有する車載 MEMS センサの実現に貢献出来るものと期待している。筆者らは、今後も様々な材料の機能性材料膜の成膜技術を確立し、車載 MEMS センサおよび次世代自動車の実現に貢献したいと考えている。

文献

- 1) T. Hattori : Mynavi News, Jun. 4, 2019 (<https://news.mynavi.jp/article/20190604-836702/>).
- 2) J. Azémar : Sensing Technologies and Markets Trends in Automotive, Yole Développement, 2019 Flex Japan/MEMS & SENSORS Forum.
- 3) Y. Takeuchi : Hyomen Gijutsu 68, 392(2017).
- 4) T. Saito : Denso technical review 17, 213(2012).
- 5) e-Words (<http://e-words.jp/w/MEMS.html>).
- 6) R. Uzawa, M. Nishikawa and T. Tanaka : Fuji Denki giho 90, 242(2017).
- 7) Hamamatsu Photonics Web site, (<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/applications/lidar/index.html>).
- 8) Ministry of Economy, Trade and Industry Web site, (<https://www.meti.go.jp/policy/automobile/evphv/what/ev.html>).
- 9) T. Fujimura : PwC Japan Web site, Jan. 25, 2019 (<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership/automotive-insight/vol3.html#vol3-1>).
- 10) T. Hattori : Mynavi News, Sep. 4, 2017 (<https://news.mynavi.jp/article/20170904-a176/>).
- 11) Jidouten-lab Web site, Oct. 12, 2018 (https://jidouten-lab.com/y_6506).
- 12) L. Ye, G. Zhang and Z. You : Sensors 17, 521(2017).
- 13) Y. Tanahashi, O. Kasono, T. Yanagisawa, T. Nomoto, I. Kikuchi and T. Ezuka : PIONEER R&D 22, 1 (2013).
- 14) S. Nakazono and S. Hiraoka : Panasonic Technical Journal 61, 23(2015).
- 15) Audi Technology Portal (<https://www.audi-technology-portal.de/en/electrics-electronics/lighting-technology/matrix-laser-technology1>).
- 16) J.-E. Källhamre: Nature Photonics, SEPTEMBER, 12(2006).
- 17) Yole Développement : Uncooled infrared imaging technology & market trends 2013.
- 18) F. Niklaus, C. Vieider and H. Jakobsen: Proc. Int. Soc. Opt. Eng. (SPIE) 6836, 68360D-1(2008).
- 19) A. Voshell, N. Dhar and M. M. Rana, Proc. Int. Soc. Opt. Eng. (SPIE) 10209, 102090M-1(2017).
- 20) ULVAC Press release, Mar. 25, 2015 (<https://www.ulvac.co.jp/en/information/20150325/>).
- 21) ULVAC Press release, Jul. 2, 2019 (<https://www.ulvac.co.jp/information/20190702/>).
- 22) T. Tsuyuki, H. Kobayashi, T. Jimbo, I. Kimura, K. Suu, Proc. Tech. Com. Electr. Dev. ED-8, Aug. 9, 2016.