

基調論文 将来のセンサ・MEMS技術の動向*

Future Trends of Sensors and MEMS

竹内 幸裕
Yukihiko TAKEUCHI

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) were breakthrough technologies of sensing devices, and were introduced to the automotive industry etc. a couple of decades ago. These days, by using the technologies, various functional micro elements can be elaborated on substrates, besides sensor. I introduce (a) development trends of (1) optical devices, (2) RF devices, (3) power generation devices, and (4) fluid and analytical devices, and (b) development approach of new devices and technology including (5) functional thin film, (6) variable filter, and (7) device fusion in DENSO Research Laboratories,

Key words :

1. はじめに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は、日本語では微小電気機械と訳される。その概念はFig. 1に示すように、メカトロニクスとエレクトロニクスの融合である。MEMSというデバイスに明確な定義はなく、学会においても人毎に云うことが異なっている。大雑把には3つの要件があり、ミクロンレベルの構造体を有する、可動部を有する、それらの形成に半導体の製造プロセスを用いていることである。半導体のプロセスを用いることから、シリコン基板上に単結晶シリコンまたは多結晶シリコンの構造体を形成したデバイスが多い。近年目覚ましいスピードで、ゲーム、携帯電話、スマートフォンに搭載されてきている加速度センサ、ジャイロも、ほとんどがシリコン基板上のシリコン構造体である¹⁾。また半導体プロセスを用いることから回路プロセスとのマッチングが可能で、回路を集積した事例も多い。

本稿ではMEMS技術を俯瞰し、センサ以外にも飛躍が期待されるアプリケーションを紹介して、デンソー基礎研究所での今後の研究開発の方向に関して述べたい。



Fig. 1 Concept of MEMS

2. MEMSの俯瞰

Fig. 2にMEMSの技術、デバイス、アプリケーションまでを俯瞰したイメージを示す。MEMSはセンサを先頭に量産化が進んできたが、実は幅広い展開を有する。図の左に示したようにMEMSの要素技術である薄膜材料、加工技術、解析技術、実装技術は、共通基盤技術である。それらを使ってどんな構造体を作りこむかで、デバイス、アプリケーションが広がっていく。

MEMSの要素技術で、LSI、メモリなど通常の半導体デバイスと大きく異なるのは、材料の機械的物性の測定・制御が必要となる点である。これは可動部または3次元的構造体を有するため、ヤング率、残留応力、破壊強度など、設計に必須となる。また構造体は多層膜となることも多く種々の薄膜としての物性値が必要となる。薄膜と明記したのは同じ材料であってもバルクとは物性値が異なり、それらが成膜条件、その後のプロセス処理などによって変化するためである。MEMS屋からみても非常にやっかいで、開発でのつまづきに悩まされる。反面ノウハウの塊であり、ものづくりにおいては差別化のポイントとなる。

加工技術においてはほぼLSIのプロセスを活用できる。具体的にはイオン注入、絶縁膜の成膜・加工、配線形成など、主に2次元的な加工技術である。これら以外にMEMSで必要なのは3次元構造体を形成するためのシリコンのトレンチエッチング・異方性アルカリエッチング、基板から可動部となる部分をリリースする犠牲層エッチングである。また薄膜材料のところで述べた薄膜構造体としての機械物性の制御、特に応力は重要で、熱膨張係数差だけではない成膜時の真性応

*2012年9月25日 原稿受理

力及びその後のプロセスでの変化をしっかりと把握，制御することが必須である。

解析技術においても通常メカニカルな変位解析を単純に流用することはできない。これはMEMSがマイクロオーダーの微細構造体であるため、人間サイズの世界で起きる現象の支配的物理量は慣性力であるが、MEMSのサイズとなるとスケーリング則から摩擦力、表面張力、ダンピングなどが支配的となる。簡単に云うと、水が入ったコップを逆さまにすると水がこぼれ落ちるのが人間サイズの現象、コップの壁面に小さな水滴が落ちずに残っているのがMEMSサイズの現象である。現象の解析にシミュレータを用いるが、MEMSで起きる現象を網羅しているとは言い難く、試作品の評価結果でシミュレータをモディファイする必要がある。

次に各要素技術で開発されている、Fig. 2中央の具体的なデバイス例を説明する。センサ分野では加速度センサ、圧力センサ、エアフローセンサ、光デバイスではビームを反射して走査するMEMSミラー、赤外線の変分光器、光ファイバー用の切り換えスイッチ、高周波デバイスでは信号をON/OFFするメカニカルスイッチ、周波数をチューンする可変キャパシタ、水晶に変わる発振器、発電デバイスでは超小型のFC（燃料電池）、タービン発電機、振動発電機、流体・分析デバイスでは流体を送り込むポンプ、バルブ、マイクロ流路などがある。これらの内、センサ以外は提案、開発レベルのものがまだまだ多い。デバイスの種類も多いためアプリケーションも豊富で、自動車、家電、

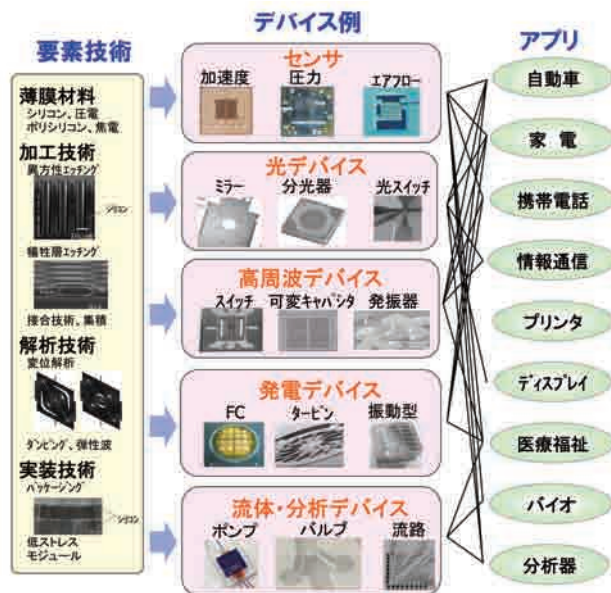


Fig. 2 Overview of MEMS

携帯電話，情報通信，プリンタ，ディスプレイ，医療・福祉，バイオ，分析器など多様である。大きな実績があるのは、自動車用では加速度センサ，ジャイロ，圧力センサ，ゲーム機では傾き検知する加速度センサ，携帯電話・スマートフォンでも加速度センサ，ジャイロ，さらにマイクロフォン，パソコン用プリンタのインクジェットデバイスである。さらなる今後の飛躍が期待される光，高周波，発電，分析分野において，もう少し詳しくデバイスの代表例を紹介してみたい。

①光デバイス

近年のインターネットの爆発的な普及と画像など大容量通信は光通信が支えている。ここでは光通信用クロスコネクタスイッチを紹介する²⁾。クロスコネクタスイッチとは光ファイバー間の接続経路を切り換えるもので従来は光ファイバーの信号をPD（フォトダイオード）で一旦電気信号に切り換え，またLD（レーザダイオード）で光信号に変えて所望の光ファイバーに入れていた。このケースでは変換効率が悪い，電気信号への切り替えでノイズが入るなどの課題があった。これを解決するものにMEMSミラーアレイがある。Fig. 3に示すような構成で，光信号を電気信号に変えることなく直接光ファイバー間をクロスコネクタすることが可能である。φ600μmのミラー背面に電

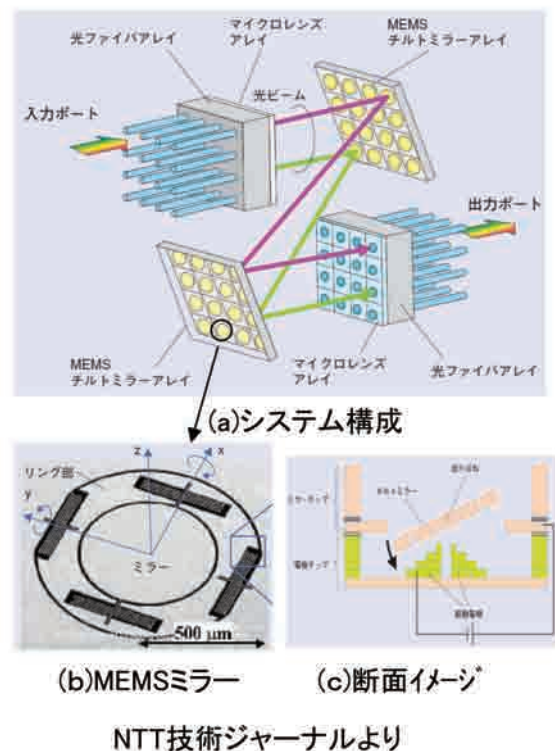
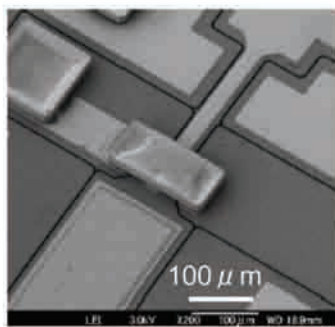
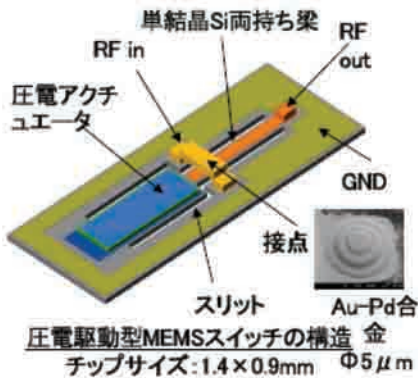


Fig. 3 MEMS Mirror for Optical Fiber Connect Switch

極を形成して、静電気力によりミラーを所望の角度にチルトさせている。

② 高周波デバイス

携帯電話、スマートフォンなど、無線通信デバイスが溢れ、割り当て可能な周波数の枯渇などが心配されており、ひとつの製品でマルチバンドに対応できるフロンエンドが求められている。従来は半導体スイッチがアンテナ切替え、バンド切替えに用いられているが、周波数が高くなるにつれ、損失の増大、絶縁性の低下、特性ひずみの増大などが大きな課題となる傾向がある。これに対してMEMSのRFスイッチは、半導体スイッチと異なり経路がすべて金属で形成され、メカニカルなスイッチ動作であるためOFF時には電気絶縁性も確保でき、線形特性が実現可能である。スイッチの一例はFig. 4に示すような概観、構成で、電極には金が用いられ、駆動は圧電である。接点寿命1億回が確認されている³⁾。



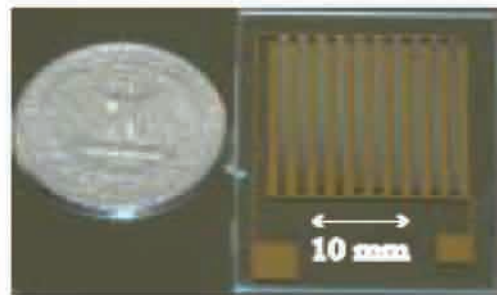
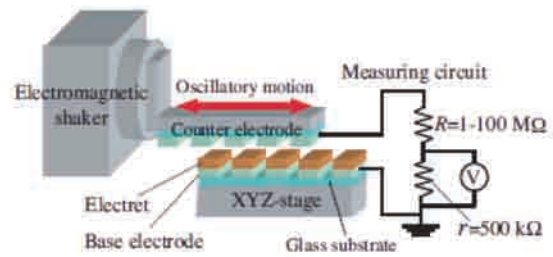
ASETホームページより

Fig. 4 RF MEMS Switch

③ 発電デバイス

MEMSの発電デバイスには2つの種類がある。ひとつはパワーMEMSと呼ばれ、エネルギー源を持って発電するもの、たとえばマイクロFC（燃料電池）、マイクロタービンなどである。もうひとつはハーベスティングMEMSと呼ばれるもので、熱、振動など捨ててい

るエネルギーを回収して電気とするものである。無線化デバイスのエネルギー供給デバイスとして注目されている。振動発電のデバイスの概観と発電メカニズムの一例をFig. 5に示す。向かい合うくし歯構造体に対向電極を設け、振動による対向面積の変化を静電容量変化に変換した発電デバイスである。片側の電極には半永久的に電荷保持できるエレクトレットを採用している。現段階では、20Hz、1G相当の振動で、20 μWの発電量である。

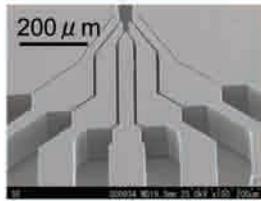
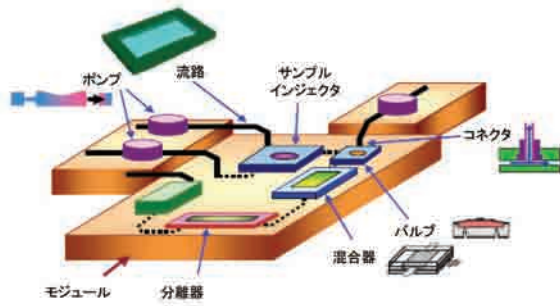


東大鈴木研ホームページより

Fig. 5 MEMS Generator for Vibration-Driven Energy⁴⁾

④ 流体・分析デバイス

Fig. 6にMEMSで構成する分析デバイスのイメージを示す⁵⁾。ガラス、もしくはシリコン基板上に各要素を集積したシステムを目指している。ガスクロ、液クロなどに代表される液体、気体など流体を扱う分析装置は、とても持ち運び容易とは云えない。これらをMEMS技術で手のひらに載るようなサイズにしようとしている。実現できれば従来のようにサンプルを採取して持ち帰った後に分析という時間のロスがなく、現場での分析が可能となる。マイクロサイズの流路では溶液の混合において攪拌ができないため拡散現象しか利用できない。このため図中にあるように流路を高アスペクト比にして接触面積を大きくして拡散を促進させる工夫がなされている⁶⁾。このシステムの課題は流体のアクチュエーションで、狭い流路での圧力損失を上回る駆動力を発揮できるポンプの開発が期待される。



MMCホームページより

Fig. 6 MEMS Analysis Device

3. デンソーでのMEMS開発

デンソーは1981年には車載としては世界初の歪ゲージ式圧力センサ（エンジンの吸気圧測定用）⁷⁾、2000年には静電容量式加速度センサ（エアバッグ用）⁸⁾を量産してきた。Fig. 2参照。圧力センサではシリコン基板を異方性アルカリエッチングを用いて厚さ数十ミクロンのダイヤモンド膜に加工して受圧部とし、加速度センサではSOI（Silicon on Insulator）基板をトレンチエッチング、犠牲層エッチングすることで、加速度で変位するくし歯構造体を形成している。デンソーのMEMS開発は、メカトロニクスをシリコン構造体、エレクトロニクスを歪みゲージ、静電容量として、センサ開発に特化してきた。強みであるMEMSを今後も拡充、発展していくには、革新性を持った新規デバイスの開発が必須である。

革新へのアプローチには技術軸から3つの方向があると考えられる。一つはシリコンではできないセンシングを可能とすること、たとえば桁違いの高感度化、高温での利用、無線化への対応である。これにはシリコン構造体に新規機能を有する薄膜を融合させることが必要となる。二つ目は今までの外力を受動的にセンシングデバイスではなく、能動的に可動させるアクチュエータとすることである。MEMS自体はスケール則により大きな力を出すことが苦手であり、これを克服するメカニズムが肝要となる。三つ目はデンソーの

強みであるデバイス同士の融合である。強みであるデバイスと融合してさらになる特長を持ったモジュールが期待される。

以下にデンソー基礎研究所での取り組み事例を紹介する。なお下記に述べる技術、デバイスに関しては、詳細な論文が本誌に掲載されているので、関心のある方はそちらを参考にいただきたい。

① 新規な機能性薄膜

センシング原理として、歪ゲージ式、静電容量式をデンソーでは採用してきたが、次の候補として高感度化を期待できる圧電式が挙げられる。PZTに代表される圧電膜の弱点は高温に弱いことであり、これを克服すると自動車での用途が大きく広がる。デンソーでは圧電定数は低いが高感度性に優れたAlN膜をベースに圧電定数を向上させることに取り組んできた。産総研との共同研究でAlNにScを添加することで、圧電定数が5倍と大きく向上することを見出した⁹⁾。Fig. 7参照。この薄膜は高温特性に優れるのみでなく電気機械結合係数も大きく、したがって弾性表面波（SAW；Surface Acoustic Wave）を用いた高周波でのセンシングにも適しており、トランスポンダー（無線）式のセンサの開発も容易とする。燃焼圧センサなど高温下で、配線の実装が困難となるセンサなどの開発が期待される。

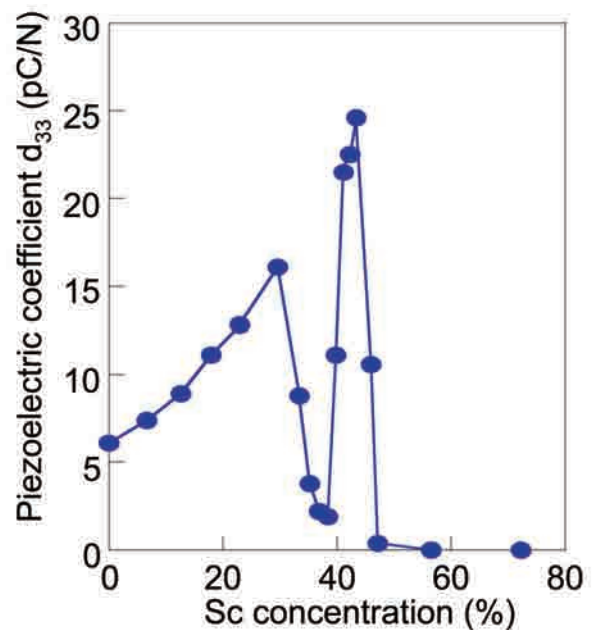


Fig. 7 Sc Concentration vs Piezoelectric d constant of ScAlN

② アクチュエータ

事例としてMEMSミラーと赤外線可変フィルタを紹介

介する。Fig. 8に示した開発中の2軸MEMSミラーはくし歯の静電駆動式である¹⁰⁾。静電駆動式は圧電式、電磁駆動式に比べ、製造工程数が少ない、サイズが小さいなどの利点がある。反面、駆動力が小さいという弱点がある。静電駆動式では駆動力を上げるためにはくし歯部のギャップを狭めることが有効ではあるが、空気のダンピングを増やしてしまう。さらにはミラーが大きく振れると速度が上がるためにくし歯のダンピングが増加し、所望の振れ角が得られない課題があった。これを解決するために連成振動を採用した。これは力を加えるくし歯部と大きな振れ角が欲しいミラー部を振動系において分離する構造である。2軸のMEMSミラーの外側にもうひとつジンバルを設け、これをくし歯部で加振する。加振はMEMSミラーの各軸の共振周波数を重畳させる。外側のジンバルの共振周波数は異なる数値に設計しておくためにくし歯部はほとんど振れない。内側のミラーには振動が伝わり共振で大きく振れるというメカニズムである。高い周波数で広角が求められるヘッドアップディスプレイなどへの展開が期待される。Fig. 9にMEMS式の赤外線可変フィルタを示す¹¹⁾。断面に示すように空洞部を持つ同じ構造が上下にふたつある。これは多結晶シリコンの構造体で空洞部には空気がある。多結晶シリコンの厚さは $0.3\mu\text{m}$ ほどと薄い。これらはシリコンと空気の屈折率差を利用した多層光学薄膜を形成しており、赤外線に対し広帯域なミラーとなる。上下のミラー間で共鳴した赤外線だけが透過することができ、静電気力でギャップを変えることで可変フィルタとなる。空気を利用したミラー構造で従来の1.5倍となる $5\mu\text{m}$ の帯域を実現した。用途としては、赤外線光源、赤外線検知

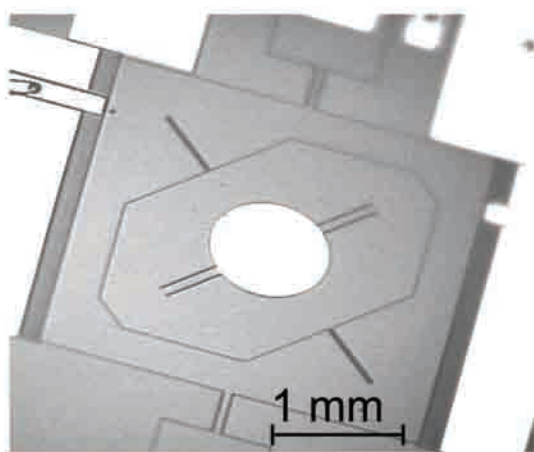


Fig. 8 Coupled Oscillation MEMS Mirror

器と組み合わせて、赤外線吸収式成分センサを想定している。車載用途では、飲酒検知、燃料性状など、複数の成分を検知するニーズがある。広い帯域での可変フィルタがあれば成分ごとに対応するフィルタを準備する必要はなくなり、サイズ、コストの面などで大きなメリットが生まれる。

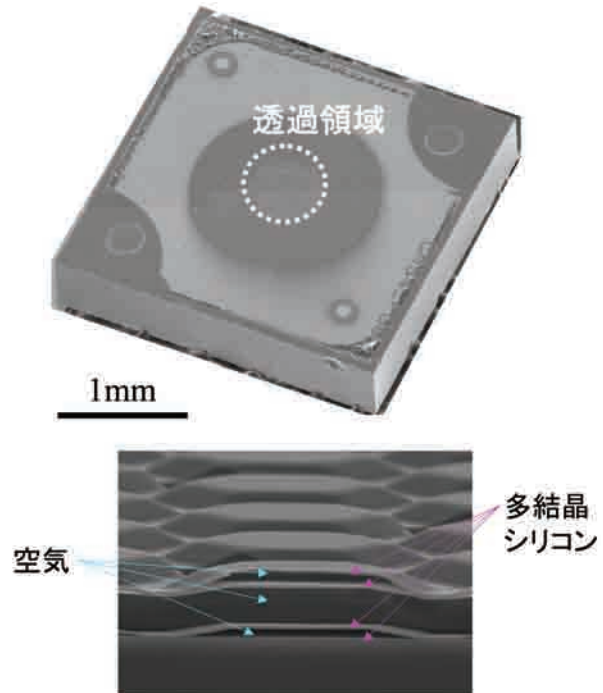


Fig. 9 Photo of Infrared Ray Tunable Filter and the Cross-Sectional View

③ デバイスの融合

先行車との車間距離を一定に保って走行するACC (Advanced Cruise Control) システムには前車との距離を測定するレーザレーダが搭載されている。レーダはレーザをパルス射出して前車からの反射が戻ってくる時間を測定して距離を算出している。ここに採用されている大出力レーザダイオードをデンソーは内製している¹²⁾。このレーザの波長は $0.9\mu\text{m}$ であるが、これをさらに進化させた $1.5\mu\text{m}$ のレーザを開発している¹³⁾。ここでいう進化は長波長化と出力である。レーザ波長は $1.4\mu\text{m}$ を超えるとアイセーフ波長と呼ばれ桁違いに目への安全性が高まる。つまり人のいる環境でも制約なく使用できる状況が各段に増える。さらに出力を従来の34Wから100Wまで向上させる開発に成功した。またMEMSのトレンチ加工技術を用い、3次元の光デバイスをシリコン基板上に形成する開発で、マイクロレンズ、マイクロプリズムのアレイを所定の位置に一括して作製できるようになった¹⁴⁾。この2つのデ

バイスを組み合わせたものが、Fig. 10に示す超小型レーザー出射モジュールである¹⁵⁾。マイクロプリズムアレイを形成したシリコン基板にレーザーダイオードアレイをマウントしている。レーザー出射部前のプリズムはそれぞれ角度を変えてあり、どのレーザーを光らせるかによってレーザーの飛ぶ方向を決定できる。従来は数cm角のポリゴンミラーを回転させてレーザーを走査していたが、百分の1以下のサイズでそれを可能としている。また可動部が無いので耐久など信頼性にも有利である。サイズ的大幅な小型化に伴い、車載以外の用途も期待できる。

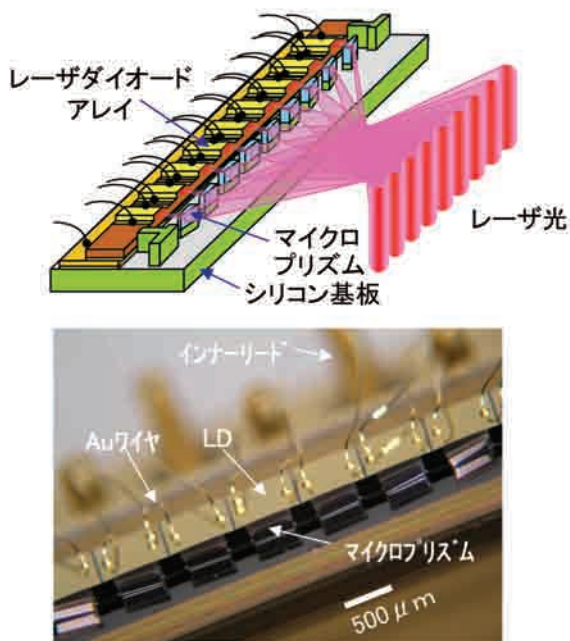


Fig. 10 Structural Image and Photo of Laser Scanning Module

4. まとめ

MEMSはセンサ、車載以外にも様々な用途があり、今後の展開も大いに期待できる。デンソー基礎研究所としては新しい展開の先駆となるように、将来の革新デバイスを創出する取り組みを継続して推進したい。特に革新デバイスの源泉となる要素技術、これの差別化に拘った研究開発を目指す。

<参考文献>

- 1) J.Marek, H.-P.Trah, Y.Suzuki, I.Yokomori : Sensors for Automotive Technology, WILEY-VCH (2003)
- 2) 山口城治, 阪田知巳, 下山展弘, 石井仁, 下川房男,

- 山本剛 : NTT技術ジャーナル, 2007.7, p.24-27
- 3) ASETホームページ http://www.aset.or.jp/kenkyu/sanjigen_2011_5.pdf
- 4) 東大鈴木研ホームページ <http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>
- 5) 財MMC資料 <http://www.nbci.jp/file/070326-2.pdf>
- 6) 早大庄子研ホームページ <http://www.shoji.comm.waseda.ac.jp/>
- 7) 鈴木康利, 今井正人, 水野千昭, 横森巖 : デンソーテクニカルレビュー, Vol.6, No.1 (2001), p.96.
- 8) Mark Harrison, Yuzuru Otuka, Minekazu Sakai : 2004 SAE, 04ANNUAL-392 (2004)
- 9) M.Akiyama, T.Kamohara, A.Teshigahara, K.Kano, Y.Takeuchi, N.Kawahara: ADVANCED MATERIALS, Vol.21, (2008.12) p593-597
- 10) H.Nishikawa, S.Kashiwada, K.Oyama, K.Nakamura, H.Ando, Y.Inagaki, K.Kano, Y.Takeuchi, N. Kawahara : APCOT 2008, proceeding No.2A1-2
- 11) 榎本哲也, 鈴木愛美, 岩城隆雄, 和戸弘幸, 竹内幸裕 : 電気学会論文誌E, Vol.131, No.7, p264-269, (2011)
- 12) 安部克則, 木村裕治, 渥美欣也, 後藤吉孝 : 社団法人自動車技術会 学術講演会前刷集No.116-00 20005540
- 13) N.Matsushita, H.Yamada, Y.Takeuchi : FAST-zero'11, TS1-6-1-1, 20117301
- 14) J. Ohara, K. Kano, Y. Takeuchi : Technical digest of MEMS 2007 pp.279-282, 2007.
- 15) 吉原晋二, 大原淳士, 安部克則, 竹内幸裕, 川原伸章 : 電気学会論文誌E, Vol.129, No.12, p433-438, (2009)

<著 者>



竹内 幸裕
(たけうち ゆきひろ)
エレクトロニクス研究部
化合物半導体デバイス・
結晶成長, Si半導体センサ
の研究開発に従事