

MEMS・センサ

Smart Society 5.0のためのEnabling Technology



田中秀治
工学研究科ロボティクス専攻
マイクロシステム融合研究開発センター
東北大学

【MEMS・センサの全体動向】

- 広がる応用 スマートフォン, スマートウォッチ, 対話型AIインターフェース, テレビゲーム, VR, AR, 5G, ワイヤレスイヤホン, ADAS, 自動運転, 生体認証, パーソナルビークル, ドローン, ロボット...
→ **Enabling Technology for Smart Society 5.0**
- デバイス・モジュールビジネスの成長

成長するMEMSビジネス



Amazon



Sharp



Intel



Apple



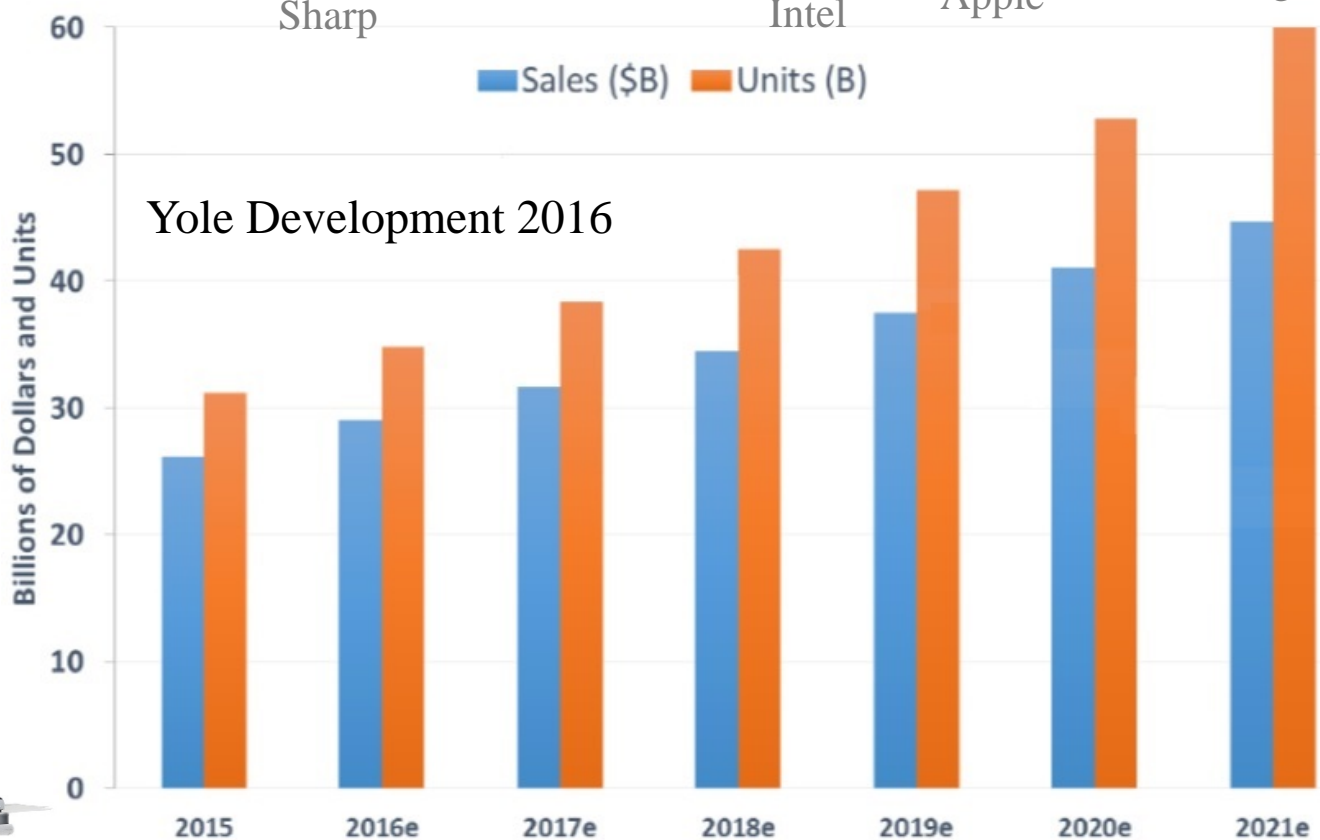
Samsung



HTC



Google



Apple



Softbank



Nissan



DJI

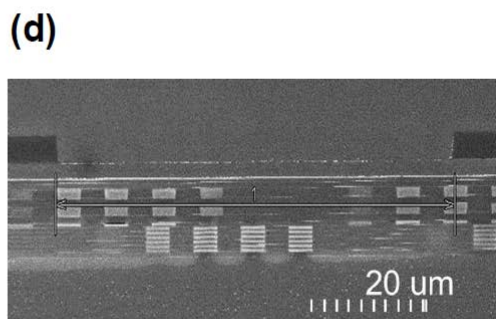
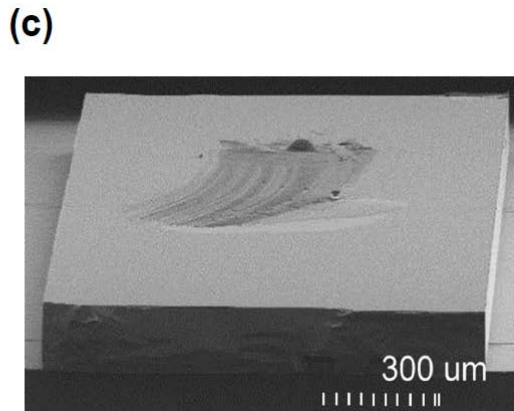
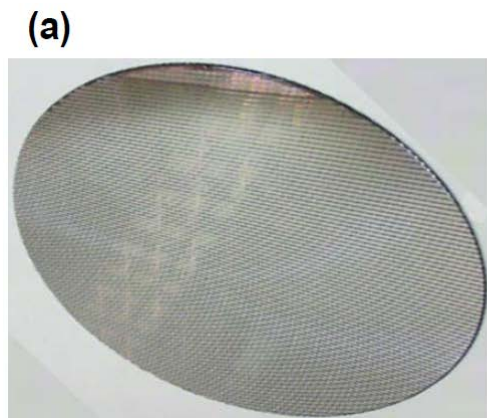


Ninebot

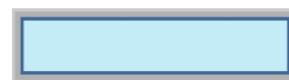
スマートフォンに代表されるコンシューマ用途が引き続き拡大
弾性波フィルタ, マイクロフォン, 圧力センサが堅調に成長

ついに12インチMEMS(TSMC)

Chun-Wen Cheng (TSMC) *et al.*, Transducers 2017, W1B.002, pp. 402-405



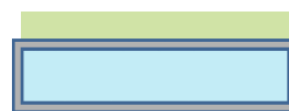
(a) Substrate with oxidation



(d) MEMS patterning



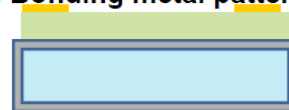
(b) Wafer stacking and thinning



(e) VHF released and hermetic wafer bonding



(c) Bonding metal patterning



■ Si-sub
 ■ Dielectric
 ■ Si
 ■ Poly
 ■ Metal
 ■ Bond Metal

(a) 12インチMEMSウェハ, (b) キャップウェハのある部分とない部分, (c) ウェハレベルパッケージされたMEMSチップ, (d) CMOS回路と集積化されたMEMSの断面

キャビティSOIを用いていないものの, TDK-InvenSenseの”Nasiri Process”と類似のプロセスと思われる。

【MEMS・センサの全体動向】

- 広がる応用 スマートフォン, スマートウォッチ, 対話型AIインターフェース, テレビゲーム, VR, AR, 5G, ワイヤレスイヤホン, ADAS, 自動運転, 生体認証, パーソナルビークル, ドローン, ロボット...
→ **Enabling Technology for Smart Society 5.0**
- デバイス・モジュールビジネスの成長
- デバイス単体からモジュールへ
- デバイス・モジュールの高度化・複雑化

モジュール化の加速

デバイス・センサ単体の販売から、個別エンドユースを踏まえたモジュール化・システム化へ

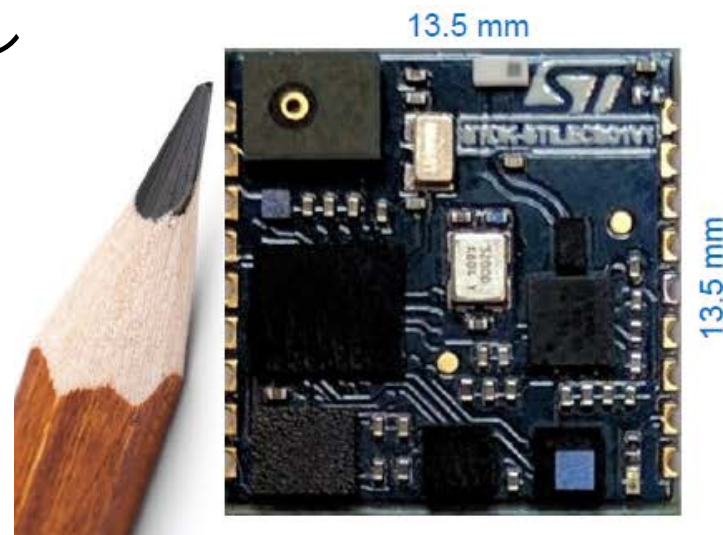
(例)

- 慣性センサ単体ではなく、歩数を出力するモジュール、さらに人の行動認識をするシステムやモジュール
- マイクロフォン単体ではなく、音源方向特定、ビームフォーミング、ノイズキャンセリング、音声認識をするシステムやモジュール
- センサフュージョンによる高性能化
- 複数のセンサを組み合わせ、必要なセンサを必要なときだけ動かし、省電力化

無線フロントエンドはLTEの導入によってさらに複雑になり、モジュール化が進展

モジュールを買えば、簡単に製品開発可能
ソフトウェアもレファレンス設計も付属

デバイスの製品ポートフォリオを整える重要性
→ M&Aが盛んに



ST SensorTile

STM32マイクロプロセッサ, 3軸加速度センサ, 3軸ジャイロ스코ープ, 3軸磁気センサ, 圧力センサ, 温度センサ, 湿度センサ, マイクロフォン, Bluetooth

【MEMS・センサの全体動向】

- 広がる応用 スマートフォン, スマートウォッチ, 対話型AIインターフェース, テレビゲーム, VR, AR, 5G, ワイヤレスイヤホン, ADAS, 自動運転, 生体認証, パーソナルビークル, ドローン, ロボット...
→ **Enabling Technology for Smart Society 5.0**
- デバイス・モジュールビジネスの成長
- デバイス単体からモジュールへ
- デバイス・モジュールの高度化・複雑化
- デバイス・モジュールメーカーのレファレンス設計通りに作れば, システムができる時代に
なぜ, 中国の新興メーカーが格安だがそこそこ良い性能のスマートフォン等を短期間で開発できるのか?

格安スマートフォンUlefone U007とMediaTekチップ

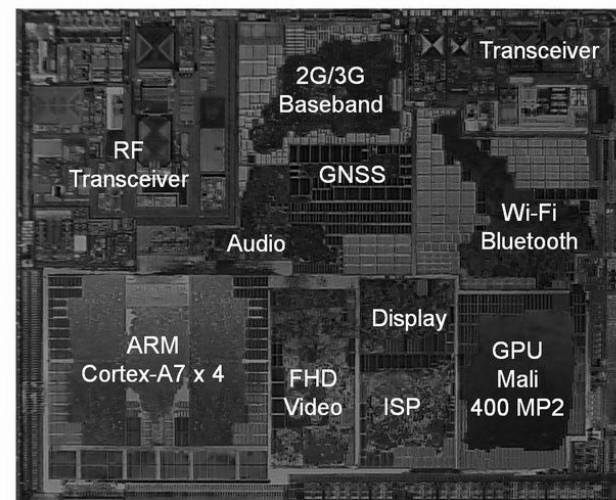
清水洋治(テカナリエ), EE Times Japan 2017.5.15



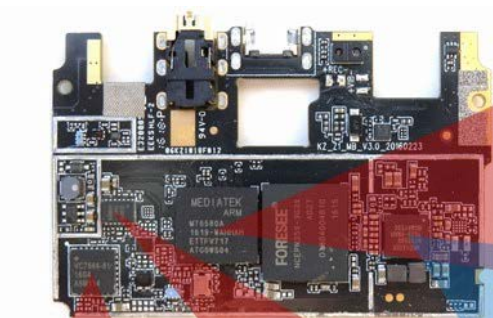
Ulefone U007
(54 US\$~)



CPU
ARM Cortex-A7 x 4
GPU
ARM Mali 400 MP2
2G/3G HSPA+
13M Camera ISP
Video 1280p HD
Wi-Fi & Bluetooth 4.0
GNSS Receiver
28nm Process



MediaTek MT6580
(RFトランシーバ, 各種メディア機能, 汎用CPU, 通信用プロセッサなど)



MediaTek MT6350
(電源ICとオーディオIC)



Power Amplifier



Antenna Switch



APL Processor
2G/3G Wi-Fi/BT/GNSS

台湾, 中国製チップで構成

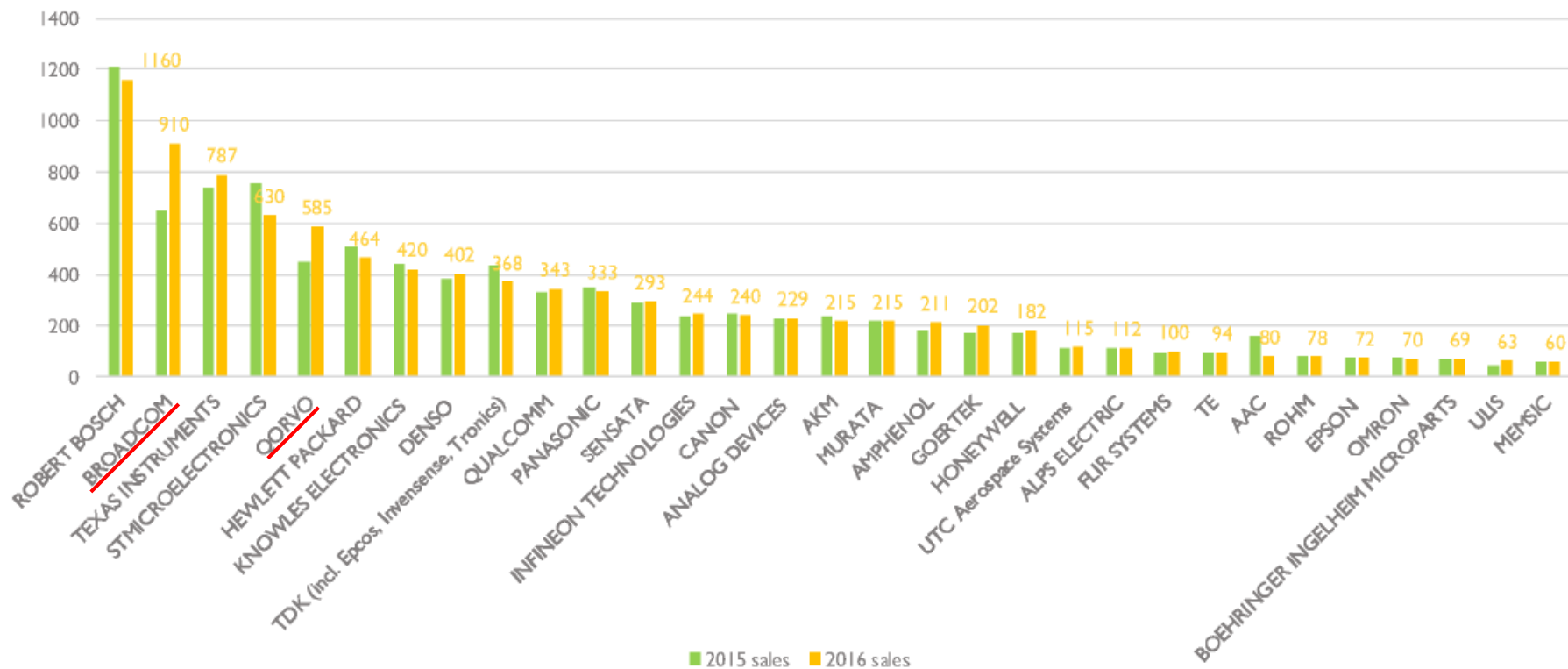
【MEMS・センサの全体動向】

- 広がる応用 スマートフォン, スマートウォッチ, 対話型AIインターフェース, テレビゲーム, VR, AR, 5G, ワイヤレスイヤホン, ADAS, 自動運転, 生体認証, パーソナルビークル, ドローン, ロボット...
→ **Enabling Technology for Smart Society 5.0**
- デバイス・モジュールビジネスの成長
- デバイス単体からモジュールへ
- デバイス・モジュールの高度化・複雑化
- デバイス・モジュールメーカーのレファレンス設計通りに作れば, システムができる時代に
なぜ, 中国の新興メーカーが格安だがそこそこ良い性能のスマートフォン等を短期間で開発できるのか?
- サプライチェーンにおけるデバイス・モジュールメーカーの力 up
- 利益率が驚くほど高いデバイス・モジュールメーカー
→ **デバイス・モジュールメーカーとプラットフォームの時代へ**

最新MEMS売上ランキング

2016 Top MEMS manufacturers – In US\$ million

(Source: Status of the MEMS Industry report, Yole Développement, May 2017)



2016年には、ついにBroadcom(旧Avago Technologies)が2位に。
STMicroelectronicsは4位まで後退。首位になった2012年(1B US\$超え)の約
6割の売上。Quorvoが肉薄。
M&AによってTDKがトップ10入り(9位)。

【材料とデバイスイノベーションのスナップショット】

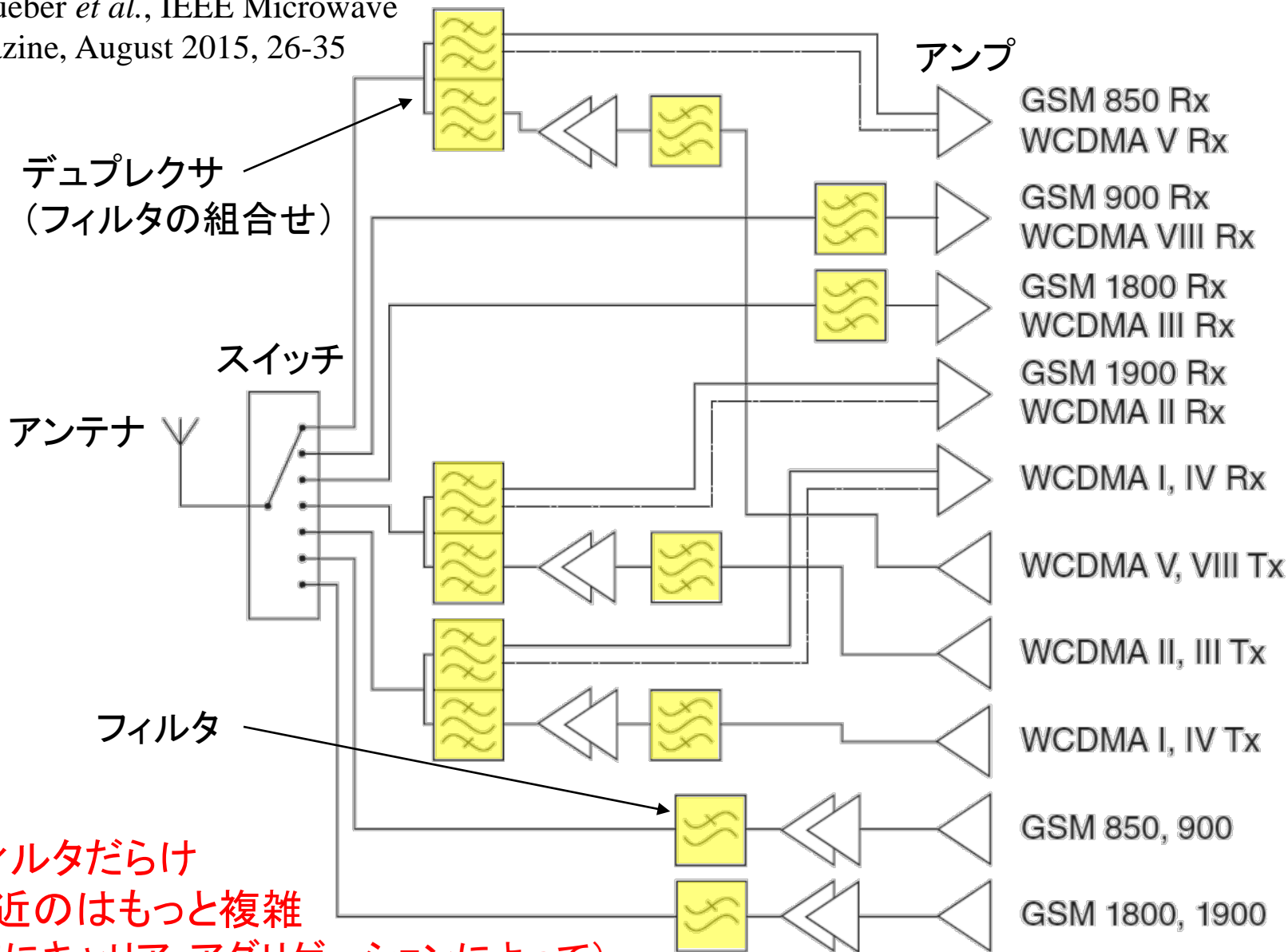
スマートフォンに用いられている**FBARフィルタ**

(MEMS技術を用いた弾性波フィルタの一種)

- FBARは圧電材料AINを用いた弾性波共振子
- 圧電薄膜としてのAINの研究は1970年代から
- FBARは東北大学の中村喜良先生らを含む3つのグループが、1980年に独立に発表

RFフロントエンド(2G + 3G)

G. Hueber *et al.*, IEEE Microwave Magazine, August 2015, 26-35



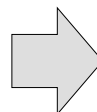
フィルタだらけ
最近のはもっと複雑

12 (特にキャリア・アグリゲーションによって)

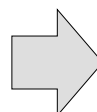
FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator)

実用化までの挑戦的な主要課題

- AlNの成膜において、理論限界ぎりぎりの k^2 を実現しつつ、応力を制御し、さらに膜厚をウェハ内で $\pm 0.05\%$ の精度で制御
- Q値を上げるためエネルギーを閉じ込めつつ、スプリアス(不要振動)を抑制(両者は基本的には背反した要求)

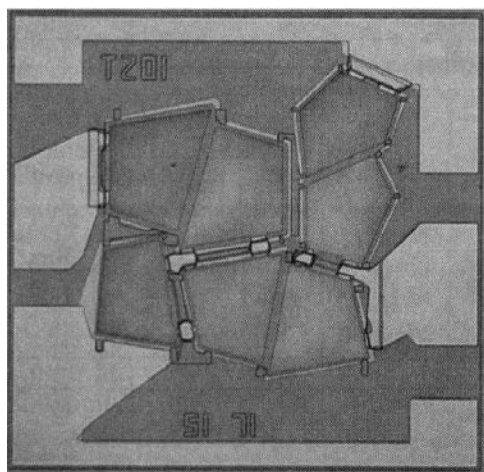


成膜技術と膜厚トリミング技術の発展



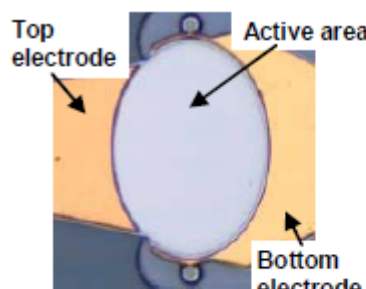
設計の進化

- エネルギー閉じ込め構造
- スプリアス抑制構造(フレーム構造, アポダイゼーションなど)

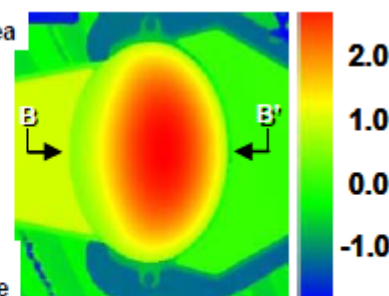


FBARフィルタ

(Avago, 現 Broadcom)



(a) Micrograph of top view of the air-gap type FBAR.



(b) Measured result (top view of contour line)

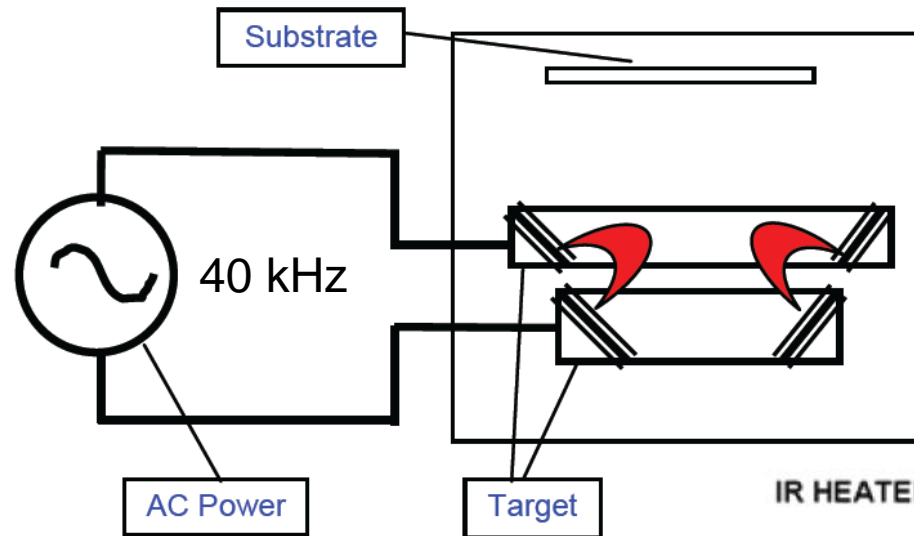


FBAR

(富士通, 現 太陽誘電)

AINのスパッタ堆積 (S-Gun Sputter)

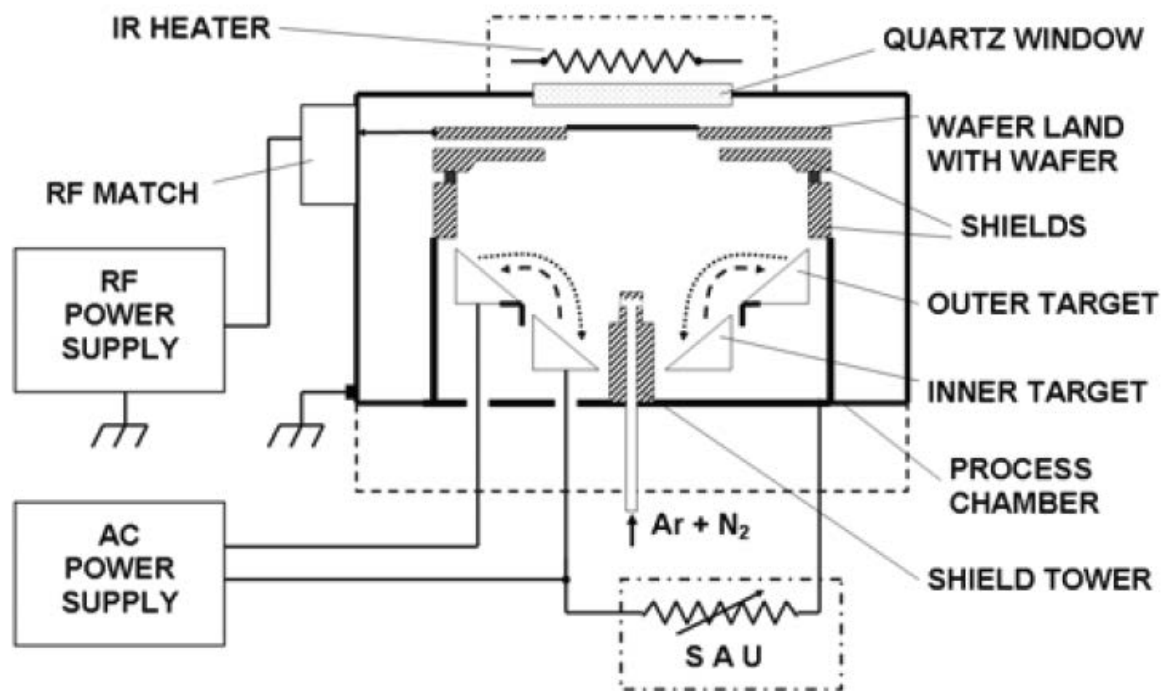
V. V. Felmetzger and P. N. Laptev (Tegal), Chiba Symposium 2010



外側／内側のターゲットが交互にアノード／カソードとなる⇒アノード消失なし
基板をRFプラズマクリーニングしてからAINを堆積
配向性には下地の表面平滑性が重要
ガス流量で膜応力を制御

【膜厚分布の調整】

外側／内側ターゲットにかかるパワーを調整 (SAU)
または、外側・内側ターゲット間にDCバイアスを印加

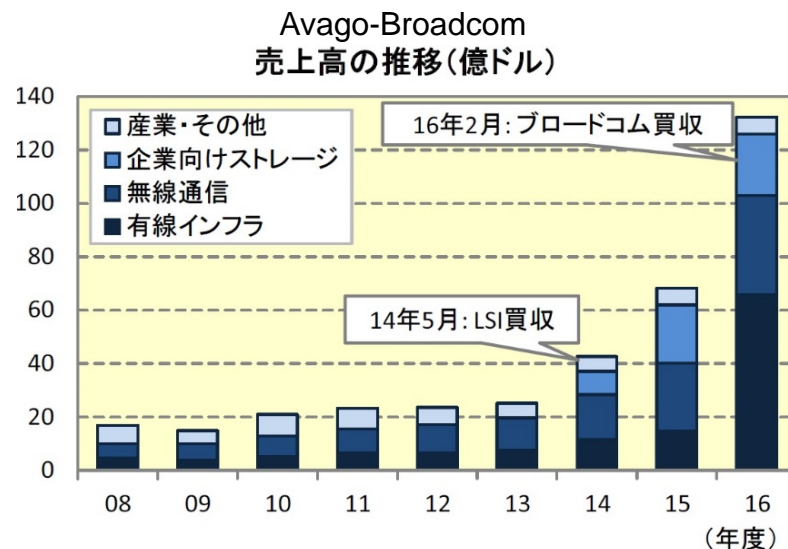


【材料とデバイスイノベーションのスナップショット】

スマートフォンに用いられている**FBARフィルタ**

(MEMS技術を用いた弾性波フィルタの一種)

- FBARは圧電材料AINを用いた弾性波共振子
- 圧電薄膜としてのAINの研究は1970年代から
- FBARは東北大学の中村喜良先生らを含む3つのグループが、1980年に独立に発表
- 1990年代末, HP (Agilent→ Avago→Broadcom) が実用化
- 実用化のタイミングが重要(米PCS)
- Avago-Broadcomは急成長, 絶好調
- 年間30億個以上のFBARフィルタをモジュールにして販売
- デバイスもモジュールも難しすぎて, 限られた企業しか作れない。



ScAlN(産総研, デンソー)

Influence of growth temperature and scandium concentration on piezoelectric response of scandium aluminum nitride alloy thin films, ¹M. Akiyama, ²K. Kano, ²A. Teshigahara, ¹AIST, ²DENSO, Appl. Phys. Lett., 95 (2009) 162107

常誘電体(キュリー点なし)

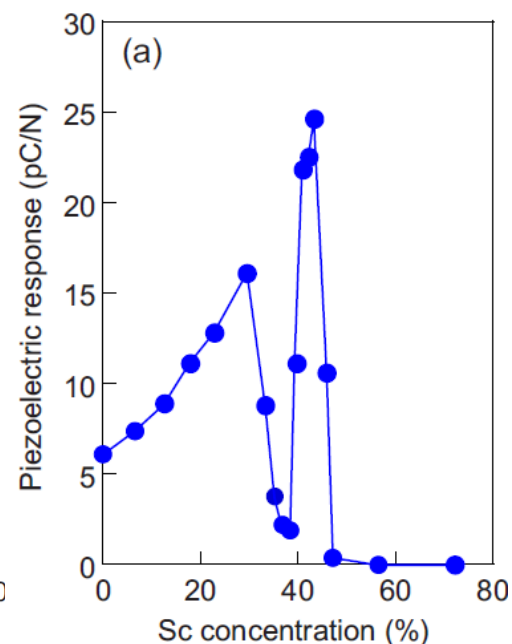
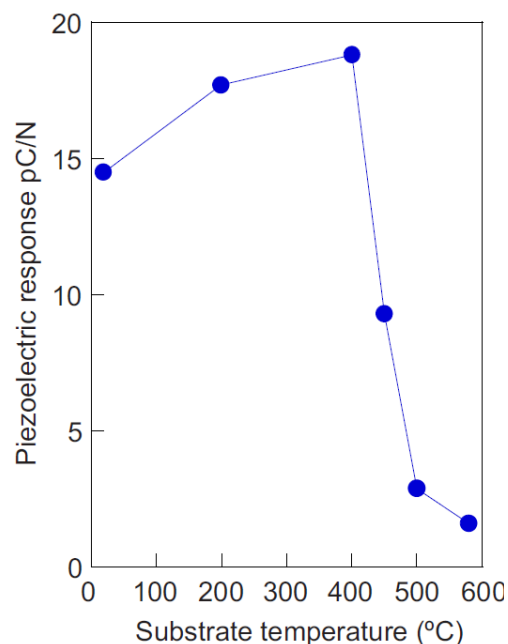
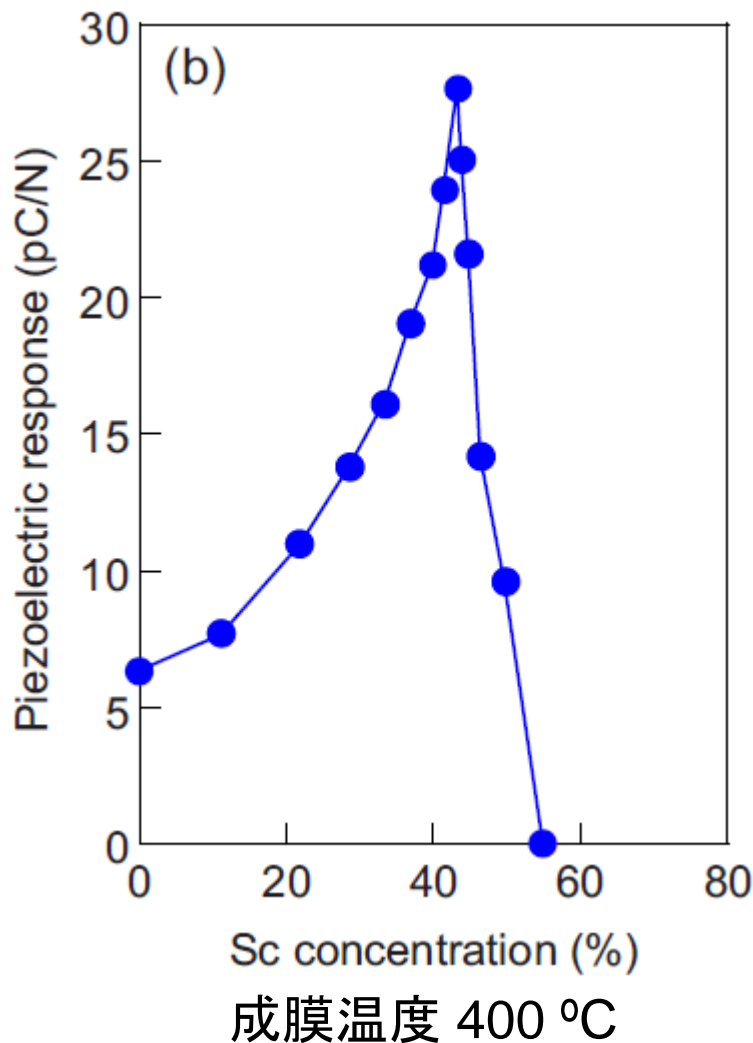
Sc 40%強で圧電性最大

圧電定数 $d_{33} > 25$: AlNの約5倍

弾性定数: AlNの約半分

誘電率 $\epsilon \sim 2.7 \times 10^{-10}$ F/m: AlNの約3倍

400 °Cでスパッタ成膜可能(400 °C以上でスパッタすると, Sc 35%付近で圧電定数にディップが生じる。)

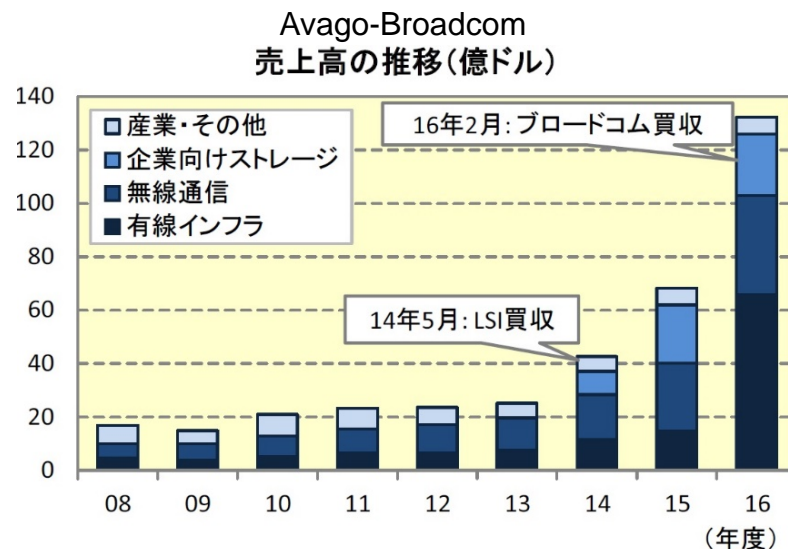


【材料とデバイスイノベーションのスナップショット】

スマートフォンに用いられている**FBARフィルタ**

(MEMS技術を用いた弾性波フィルタの一種)

- FBARは圧電材料AINを用いた弾性波共振子
- 圧電薄膜としてのAINの研究は1970年代から
- FBARは東北大学の中村喜良先生らを含む3つのグループが、1980年に独立に発表
- 1990年代末, HP (Agilent→ Avago→Broadcom) が実用化
- 実用化のタイミングが重要(米PCS)
- Avago-Broadcomは急成長, 絶好調
- 年間30億個以上のFBARフィルタをモジュールにして販売
- デバイスもモジュールも難しすぎて, 限られた企業しか作れない。
- Avago-Broadcomは高結合のScドープAINを用いたFBARフィルタも実用化



【材料とデバイスイノベーションのスナップショット】

このスナップショットから学ぶことは:

デバイス・モジュールでは,

材料, 設計, 生産...の全てにおいて極めて高い技術を開発または用意した者のみがイノベーションに達する。

実用化のタイミングが重要

→ 先んじて潜在的なビジネスチャンス(具体的ニーズ)をつかみ,
スピード感を持って研究開発

科学技術振興に留まらず, イノベーションを目指すなら

「ナノテクのシステム化」

「ナノシンセシス」

【日本の課題: デバイス・センサー分野】

デバイス性能で勝負できない。

多くの研究者が「新コンセプト」に逃げている。しかも、筋の通った「新コンセプト」は少ない。

“Only one”はできても，“Number one”は難しい。

なぜか？

デバイス設計，製作，システム化（フロントエンドを含むエレクトロニクス，FPGA，ソフトウェアなどとの）まで，総合的に研究開発できる力が不足。

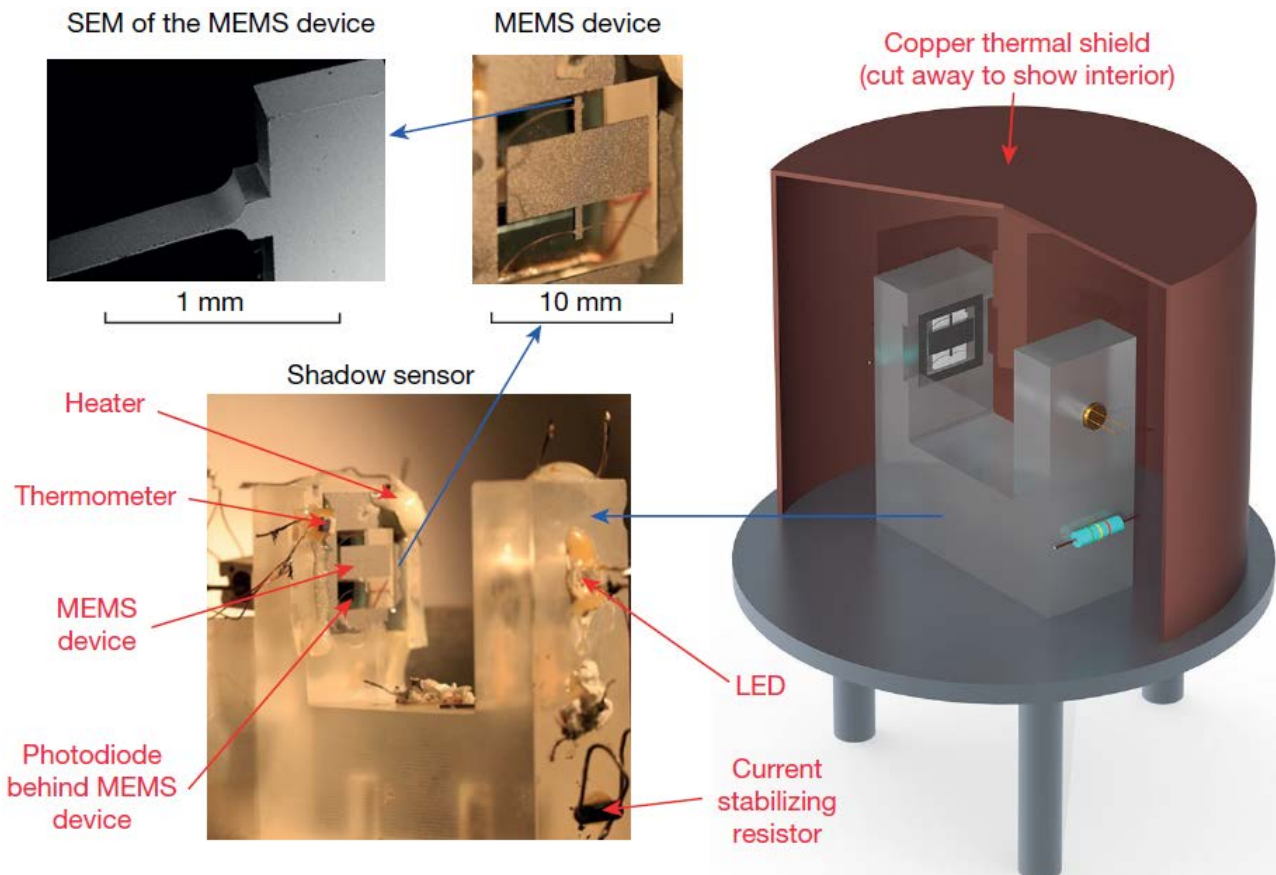
「グランドチャレンジ」には挑戦できない。

「できる研究グループ」にはあるクリティカルな規模がある。

基礎研究でも性能で勝負した例: MEMS重力センサ

MEMS重力計

R. P. Middlemiss *et al.* (University of Glasgow), Measurement of the Earth Tides with a MEMS Gravimeter, *Nature*, 531, pp. 614-617



第一にMEMS構造が優れているが、MEMSセンサの他、低ノイズ化のためのエレクトロニクス、真空パッケージング、精密温度制御、データ処理など、全ての要素が揃わないと $40 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度は出ない。

資源探索，遺跡探索，地下トンネル探索，海拔計測などの用途

【デバイス分野の状況分析】

- ナノテクプラットフォームによって微細加工の裾野は広がった（極めて有意義）。素人でも比較的簡単に微細構造が手に入る。
- ナノテクプラットフォームはツールであり、ツールを整えただけでは目的半ば。プロの利用者（デバイス研究者）も増えるべき。
- しかし、アカデミックでのデバイス研究の難しさから、日本ではデバイス研究者の人口は減っている。
- MEMSの学術基盤は、微小機械における損失とノイズの実学。DARPAは、これを踏まえたファンディングを手を変え品を変え、20年以上行っている。→ 王道がわかる研究者が少なくない。
- 個々のテーマはスピードを要する。一方、長期視点に立ちデバイス研究の実力を上げていく必要がある。
- Smart Society 5.0を迎え、「デバイス・モジュールメーカーとプラットフォームの時代」が来る。日本はどちらが得意か？
- 「ツール」を整えた今、今度は中身に投資する時機。

【デバイス分野の状況分析】

- 既存の大学研究室や産総研では、「MEMS・センサのグランドチャレンジ」のような研究開発は簡単ではない。
- フラウンホーファー研究機構のモデルは参考になる。

(たとえば)

- 研究開発を「ビジネス」として行う。
- ビジネスモデルを作り、それに沿って民間企業等からコントラクトが取れたかどうかを評価。
- 契約額(顧客の内部研究費は含めない)に応じて公的資金によって支援。支援は契約額の30%程度以下。
- 大学研究室と併存(卓越大学院の思想)。

マイクロデバイスの研究開発, お手伝いします。

基礎研究から製品開発まで
小片ウェハから6インチウェハまで

企業単独での開発より短時間・低コストで成果が得られるように支援します。
本学で試作したデバイスの商用利用も可能です。

MEMSの技術と事業に関するコンサルティングも行っています。
企業からのオーダーに応じてプライベートセミナーを開催します。

田中(秀)研究室が一貫してお世話

研究室
クリーンルーム

小片ウェハ

マイクロ・ナノセンター
(MNC)

4インチウェハ

マイクロシステム
融合研究開発センター

6インチウェハ

 Micro Electro Mechanical Systems lab
Tanaka Shuji Laboratory



最近, こんな事例があります。

ファウンドリで作製したLSIウェハに, 本学でTSVを形成して,
これを顧客企業で作製したMEMSと, 本学でウェハレベル集積化

顧客企業が希望する仕様のMEMSを本学で設計,
仙台地域のMEMSファウンドリで試作

顧客企業の次世代デバイスの提案, 開発

本学で開発した装置を顧客企業が購入し, それを本学に設置してプロセス開発

共同研究員の受け入れによる共同研究

装置利用機会提供

設計指導(学術指導)

社内プライベートセミナー, コンサルティング

S. Tanaka Laboratory

Department of Robotics & Microsystem Integration Center

Tohoku University



Professor
Shuji Tanaka



Project Prof.
Michio Kadota



Assoc. Prof.
Hideki Hirano



Assoc. Prof.
Jörg Frömel



Assoc. Prof.
Masanori
Muroyama



Assoc. Prof.
Shinya Yoshida



Assist. Prof.
Takashiro
Tsukamoto

Research menu in 2017

- Sensor systems for human-friendly robots
- Frequency control devices (SAW and BAW devices)
- Advanced inertial sensors
- Acoustic sensors
- Integrated biosensors
- Piezoelectric thin films and devices (Epitaxial PZT on Si)
- Heterointegration and wafer-level packaging technology
- MEMS process tools (ALD, wafer bonder etc.)



Micro Electro Mechanical Systems Lab

Tanaka Shuji Laboratory



In cooperation with

Fraunhofer