

MEMSの技術動向

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 江刺 正喜

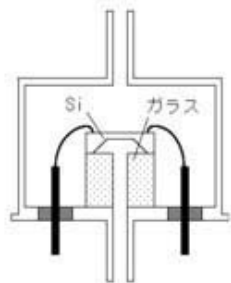


1. はじめに
2. MEMSセンサとパッケージング (スライド7-39)
(圧力センサ、加速度センサ・ジャイロ、イメージセンサ、成分センサ、医療用センサ)
3. 集積化MEMS (スライド40-75)
4. オープンコラボレーション (スライド76-87)

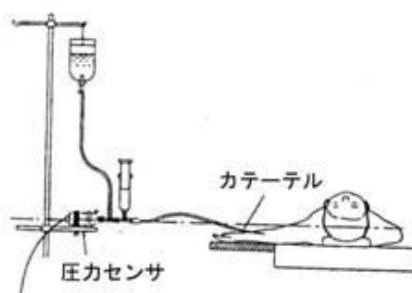


手作りによる20mmウェハプロセス用の安コスト・多自由度の試作設備

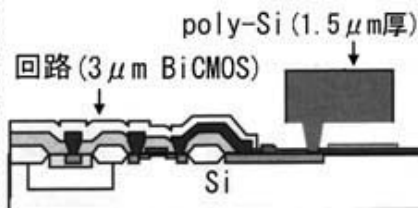
危険なガスは使わない、壊れる部分が少ない単純な装置、多くの研究室で共同利用、通算約100社以上 2年程度常駐、**全工程を実際に経験した人材の育成** ²



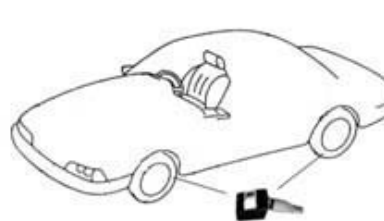
エンジン制御用
圧センサ(排気
ガス規制対応)



血圧センサ



エアバッグ用加速度センサ
(衝突検出)



タイヤ圧モニタ



マイクロホン



デジカメ用ジャイロ
(手振補正)



ユーザインタ
フェース用
加速度センサ

圧力センサ
マイクロフォン

加速度センサ
ジャイロ

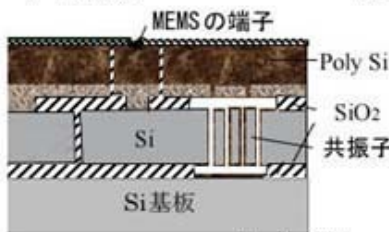
(機械量センサ)

MEMS：構造体
＋センサ＋回路
＋アクチュエータ

特長：

小形（高感度、
高速応答、低消
費電力、高空間
分解能）

集積化（低コス
ト、アレイ構造）



発振器



MEMSス
イッチ

発振器・フィルタ
スイッチ
(高周波・通信)



プリンタヘッド



ビデオプロジェクタ



赤外線イメージャ

印刷・表示・撮像
(アレイMEMS)

1980年

1990年

2000年

2010年

主要なMEMS製品化 (製品個数10倍/年、売上+15%/年)

Sensors Are Already Pervasive



MEMS Microphones
for Noise Cancellation

Camera

Touch Screen

GPS/A-GPS

WiFi Position

Microphone

Pressure



Light Sensor

Accelerometer

Magnetometer

Capacitive Touch

Gyroscope

Temperature

Sensors in Tablets and Smartphones

(S.Gervais-Ducouret, SEMICON Europe 2011)

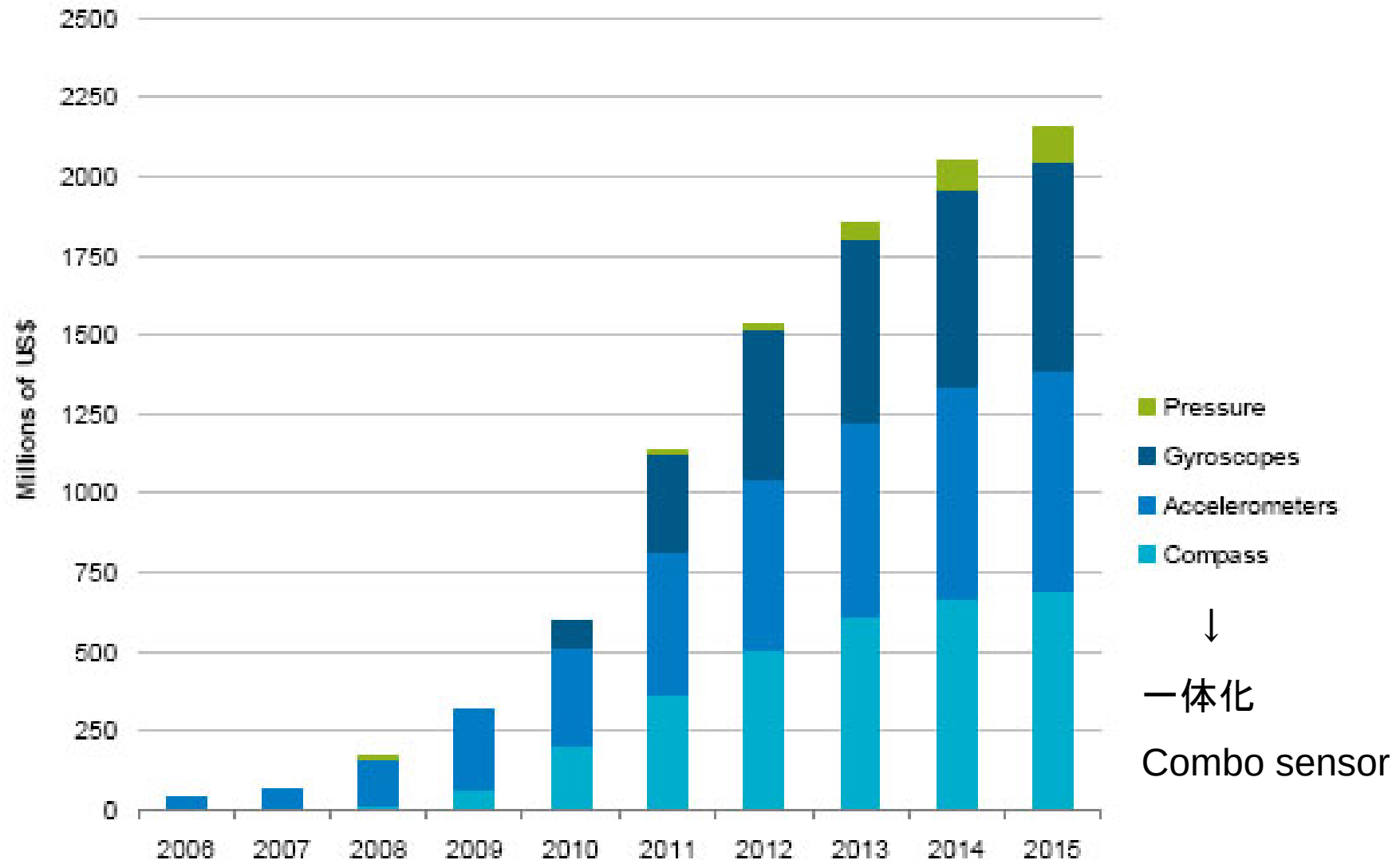
Main PCB with
MEMS
Microphone,
Accelerometer,
E-Compass,
BAW Duplexer

Microphone PCB with
MEMS Microphone



(J.Bouchaud, SEMICON Europe 2011) ST Mcroelectronics (M.Sakata, ISIM2012) ⁴

Motion sensors in Handsets and Tablets (accelero, gyro, pressure + compass)

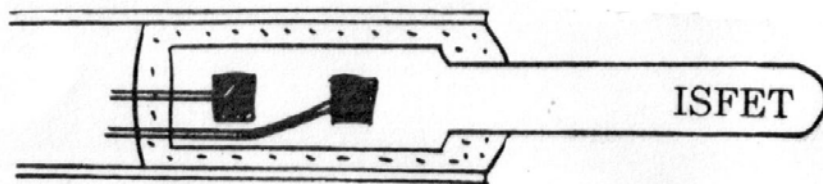
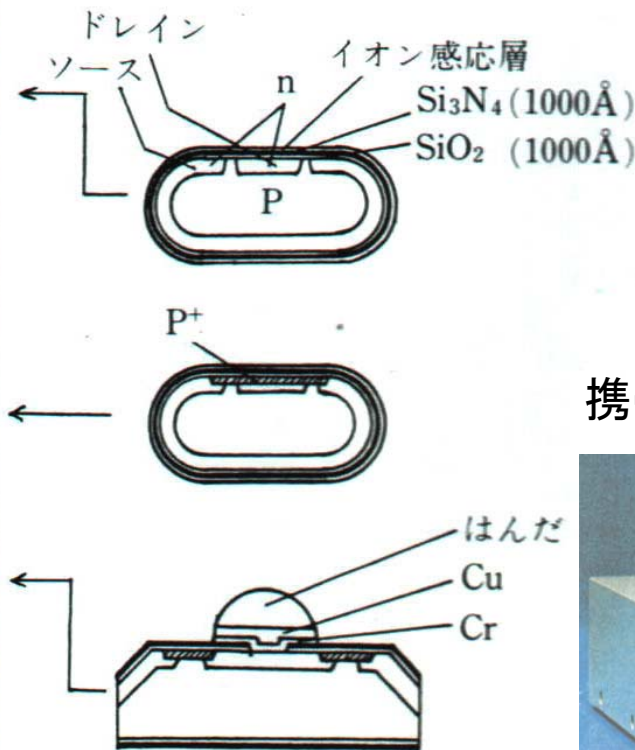
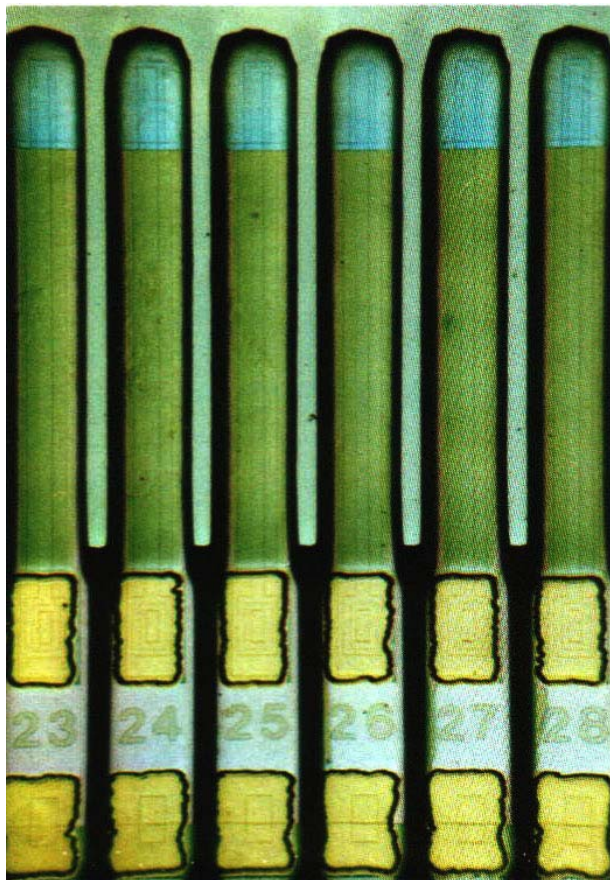


Source: IHS iSuppli Special Report
"Motion Sensors in Handsets and Tablets", H2 2011

Price is Decreasing Rapidly

ASP evolution for MEMS accelero, gyros & compass in mobiles & Mfg Cost





半導体センサーのpH計
新電元pH BOYシリーズ



自動1点校正式 自動2点・3点校正式
KS701 KS723

簡単・高安定・生活防水/
寿命が見える交換可能な電極



携帯用pH計



2.4mmにISFETと比較電極を一体化
クラレ、日本光電のpH, CO₂
モニタカテーター

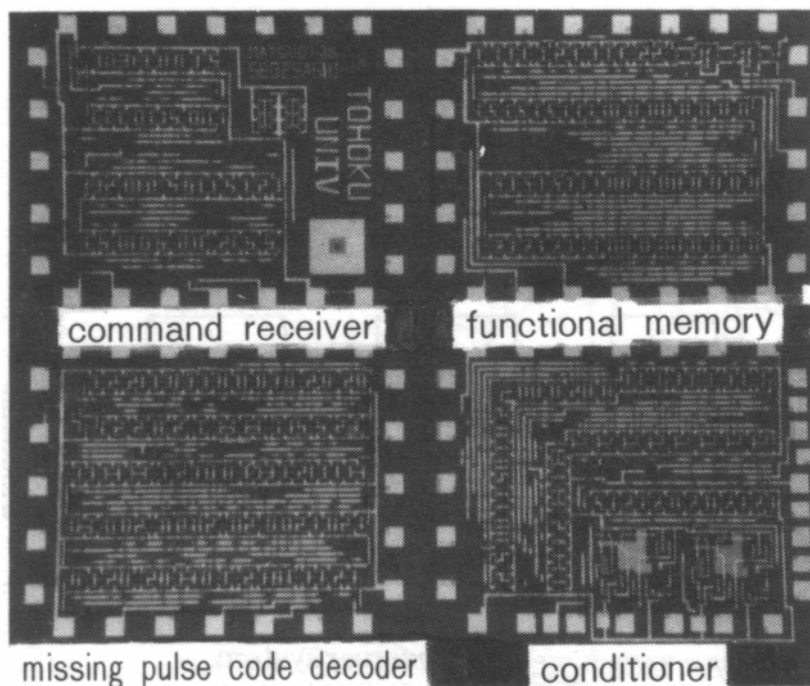
認可を受け1980年に製品化

装着し易く工夫したISFET(半導体イオンセンサ)

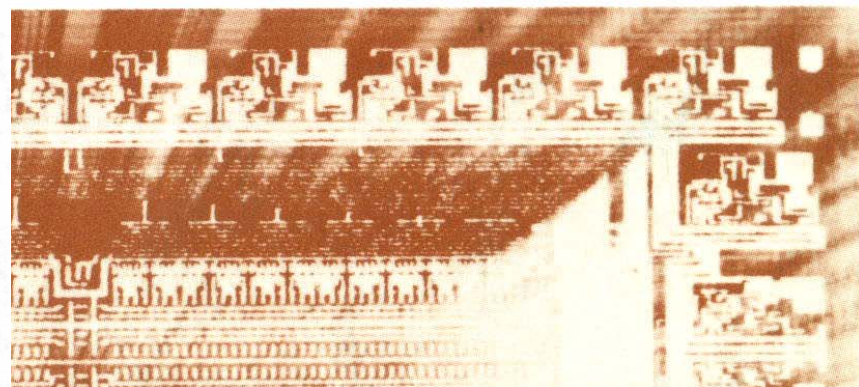
(M. Esashi, Supplement to the J.J.A.P., 44 (1975), 339-343)

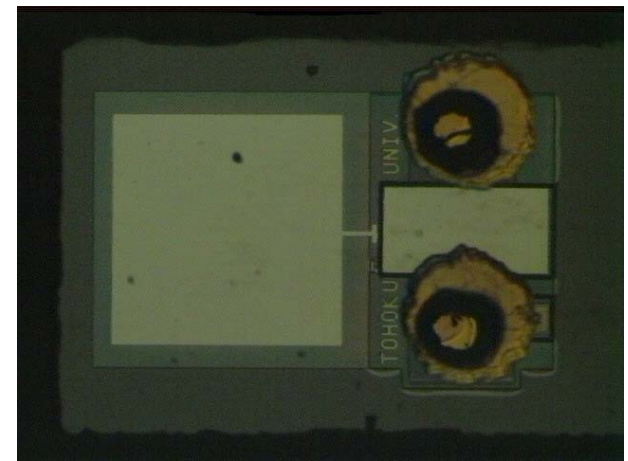
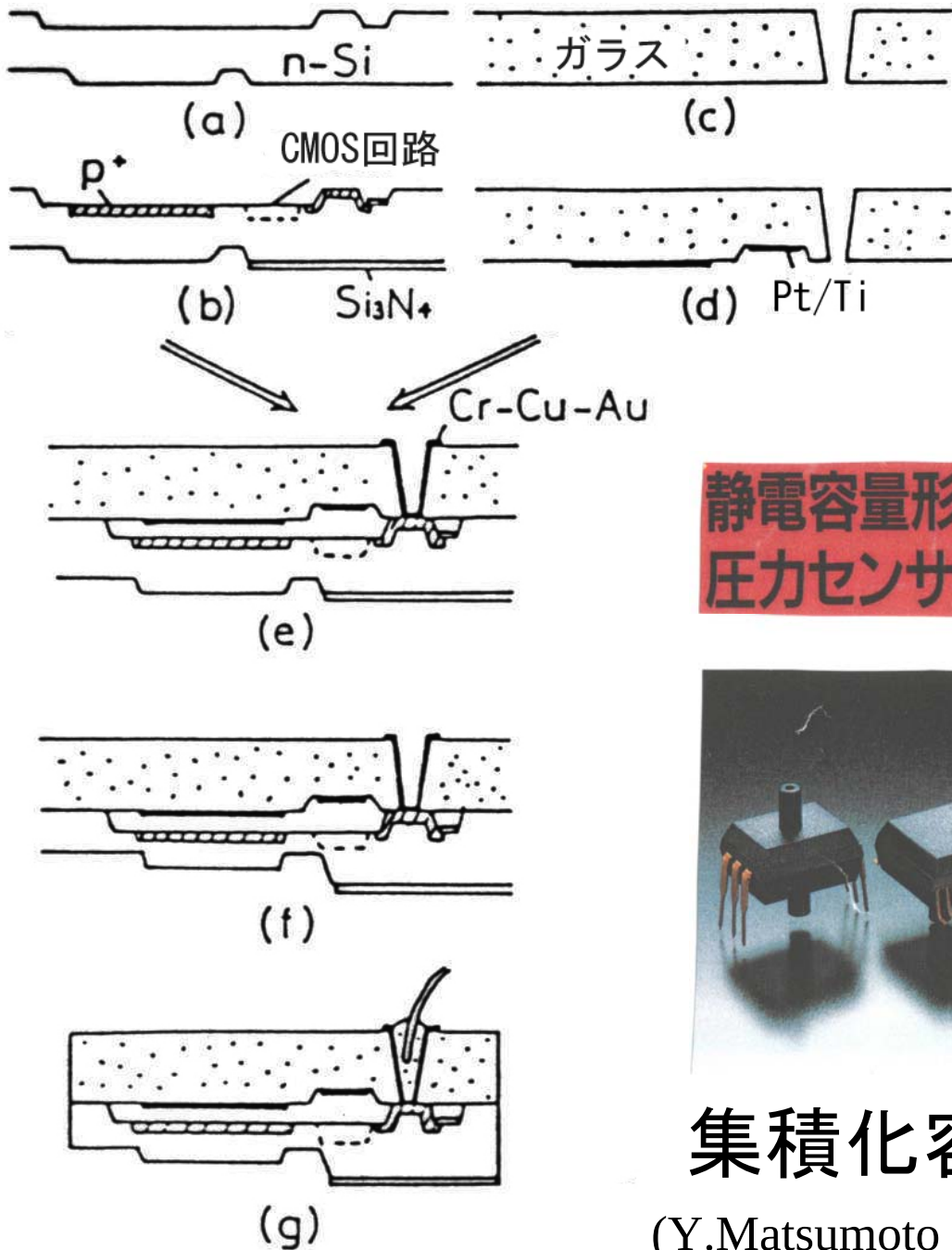
半導体集積回路設計の基礎

西澤潤一編 江刺正喜著



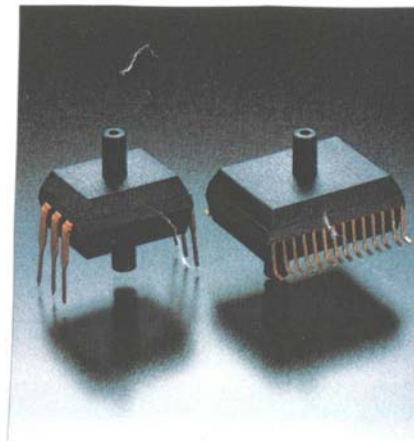
培風館





静電容量形モリシック 圧力センサ

TOYODA
CS 2000
SERIES



●超微圧測定に最適

測定定格は10mmH₂O～。超微圧領域まで測定できます。

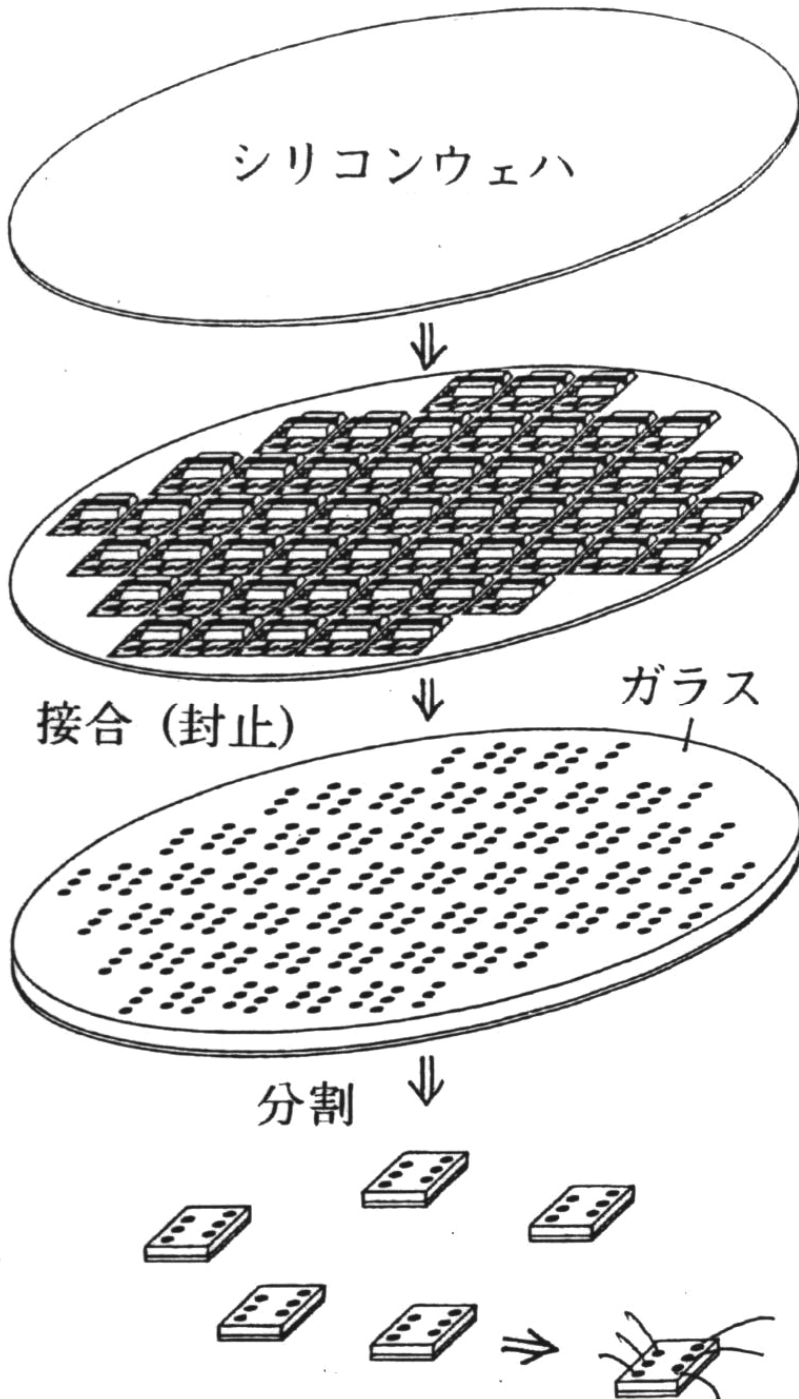
●超小形

- プロセス制御機器
- 医療機器
- 空圧制御機器
- 家電製品
- コンピュータ周辺機器

集積化容量型圧力センサ

(Y.Matsumoto et.al.11th Biotelemetry, 1990)

シリコンウェハ



MEMSの問題点：ハイテク多品種少量でコスト高、動く構造があり樹脂封止できない

・コストの70%はパッケージングとテスト

→ ウェハレベルパッケージングによるMEMSデバイス開発。



組立工程の設備が不要

MEMS部が分割時に保護される。

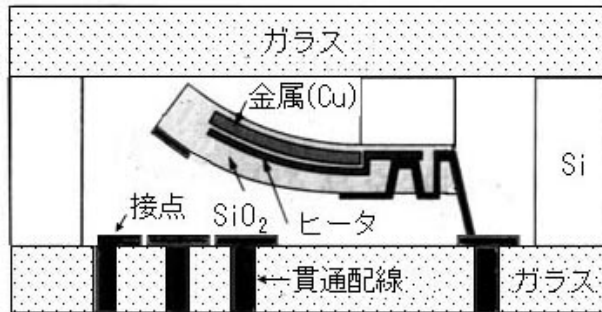
チップサイズに小形化できる。

テストの時に不良品を容器ごと捨てなくてよくなる。

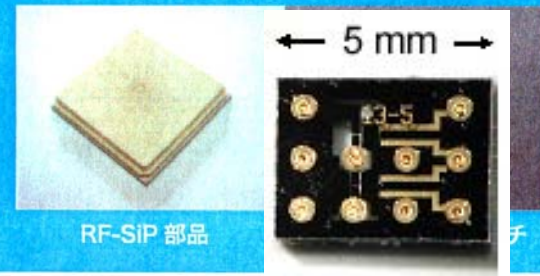
ウェハレベルパッケージング 10

アドバンテスト社製
半導体試験装置
T2000 シリーズ

半導体デバイスの性能や動作を試験して
良品だけを世の中に送り出しているのが
アドバンテストの半導体試験装置



アドバンテスト
コンポーネント社製
半導体試験装置を支える
キーデバイスを提供



RF-SIP 部品

ADVANTEST®

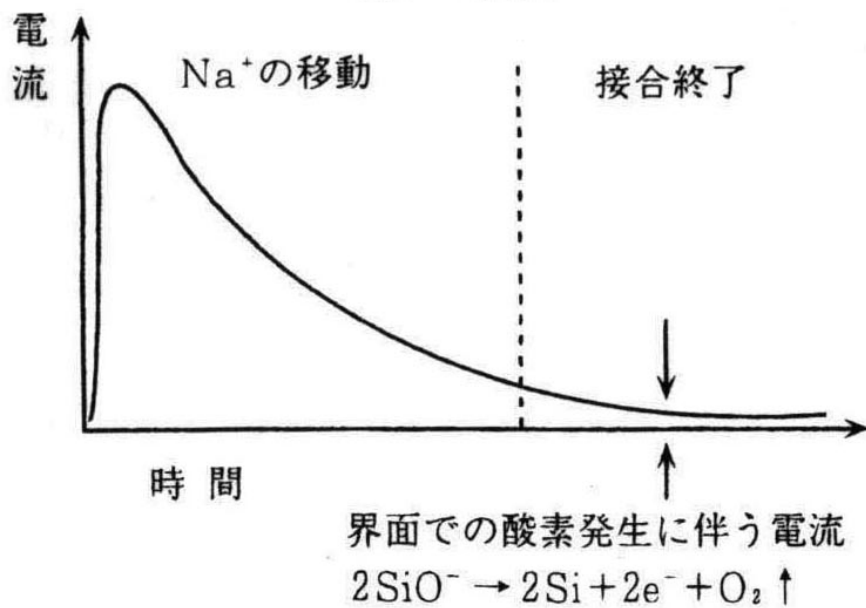
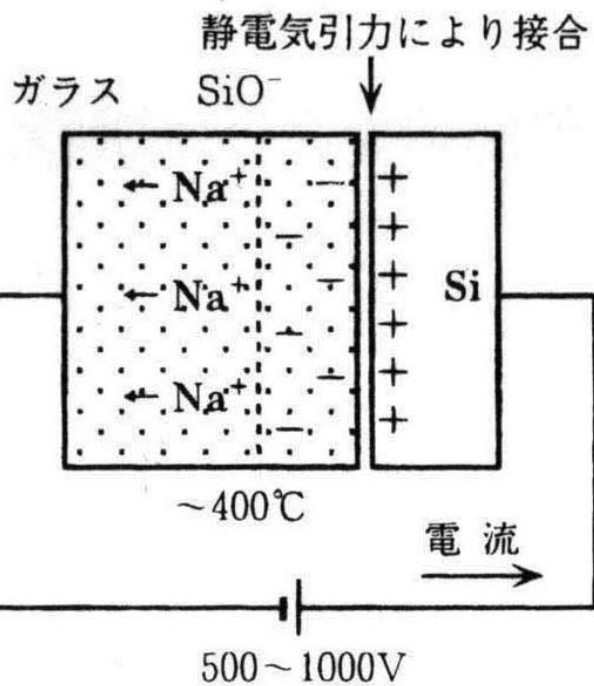
静電破壊耐性 (1000V)
広周波数帯域 (DC~10GHz)

LSIテスト用MEMSスイッチ

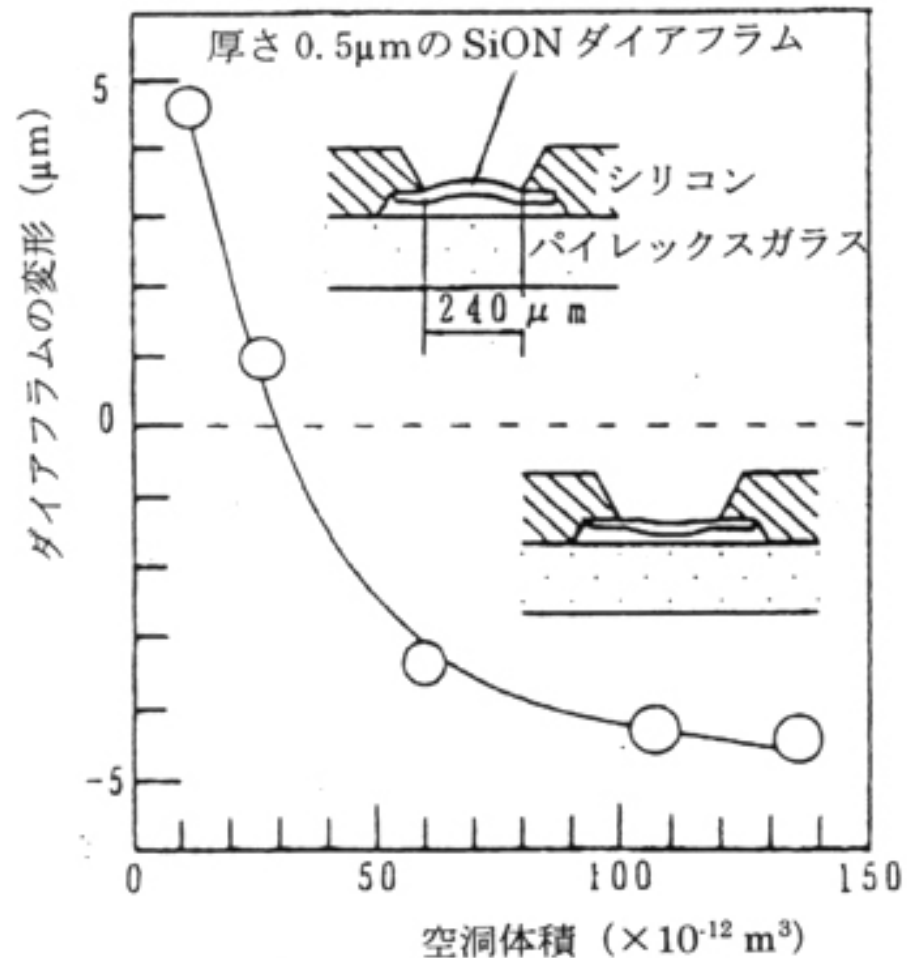
(中村陽登 他、Advantest Technical
Report, 22 (2004), 9)



アドバンテストコンポーネンツ
(MEMSスイッチ工場)(仙台市愛子)



陽極接合 (アノードックボンディング)



陽極接合時の酸素ガス発生



(裏則岳 他, 第11回センサの基礎と応用シンポジウム講演概要集, (1992), 63)

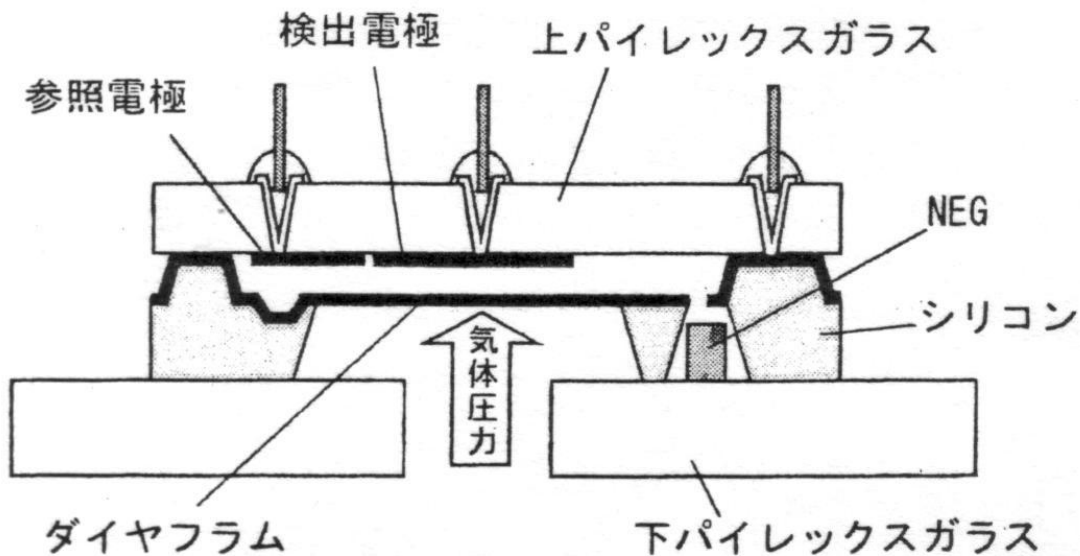


Table 1 主な仕様

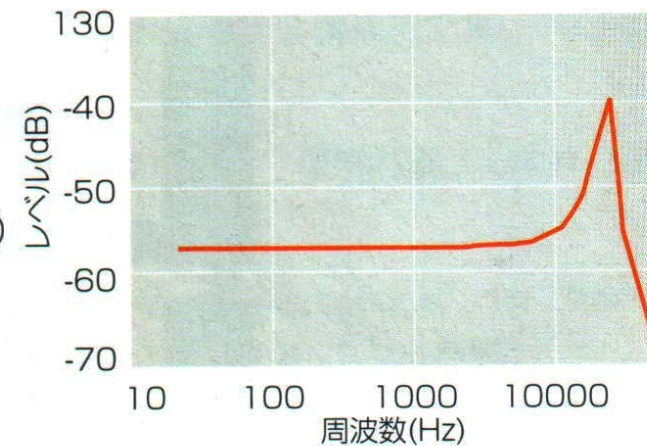
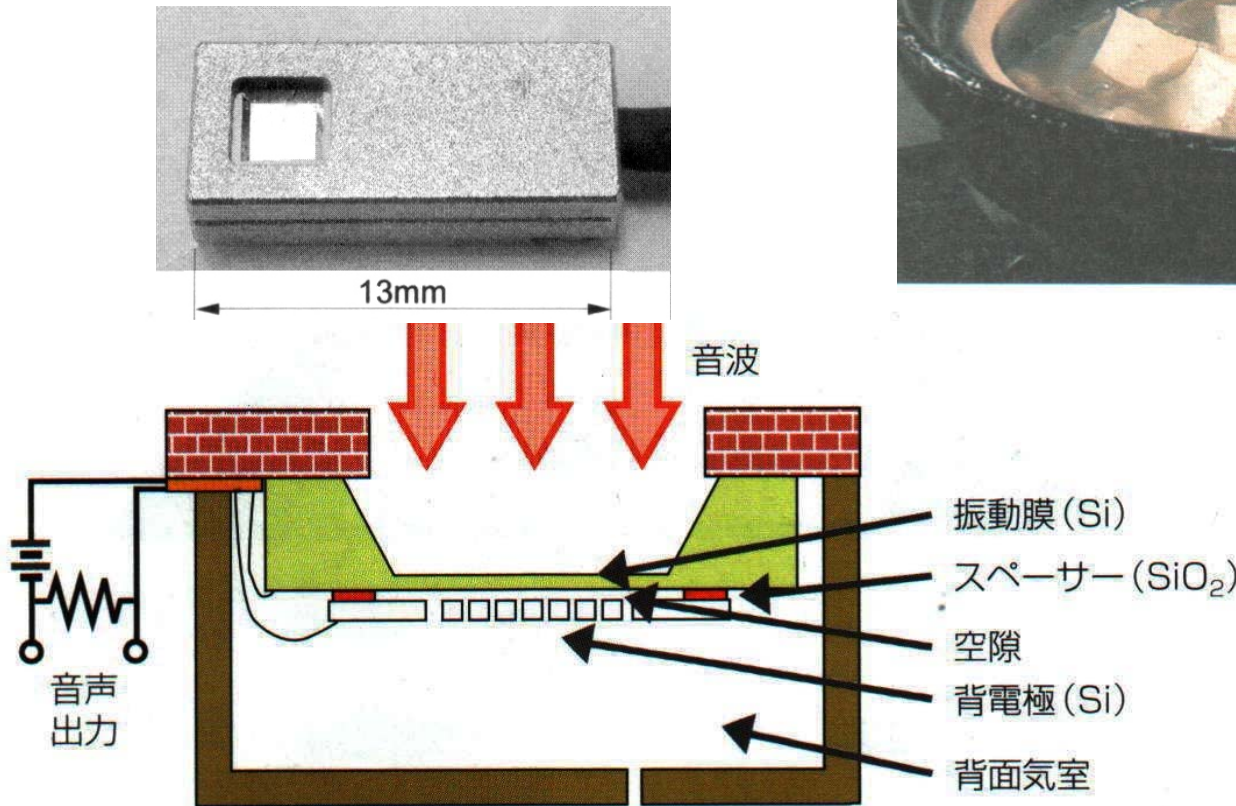
測定レンジ	133.32Pa(1Torr)
精度	0.5% of Reading
ゼロ点温度係数	0.05%FS/°C
スパン温度係数	0.06%FS/°C
応答速度	20ms
センサ出力	0~10V
使用温度	15~35°C
センサヘッド大きさ	φ38×L66mm
センサヘッド重さ	約170g
入力電源	13.5~26.4VDC
消費電力	0.5W

FS：フルスケール

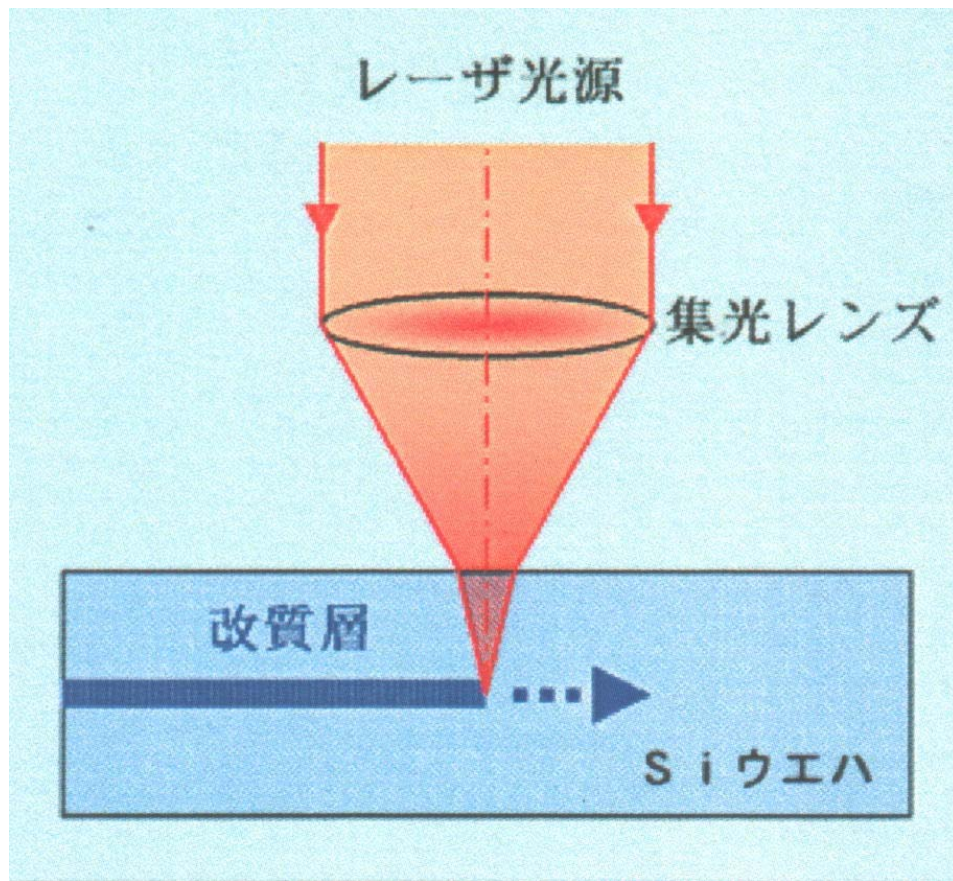
容量型真空センサ

(宮下治三、アネルバ技報、11 (2005) 37)

”ダーウィンが来た”、”北京オリンピック”の水泳競技など湿度が問題になる所で使用



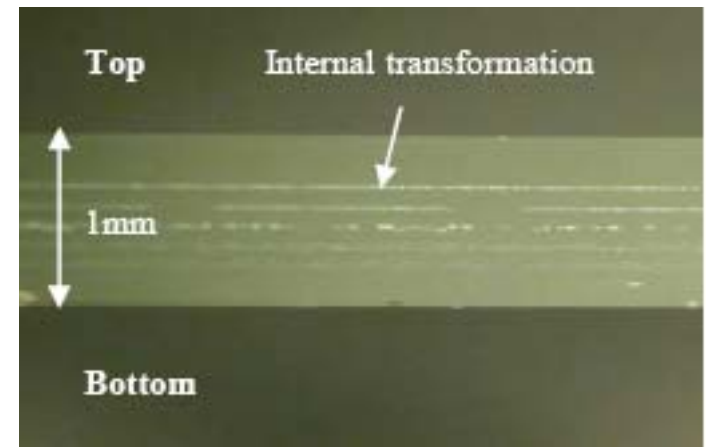
マイクロマシニングによる容量型マイクロフォン (NHK, パナソニック)



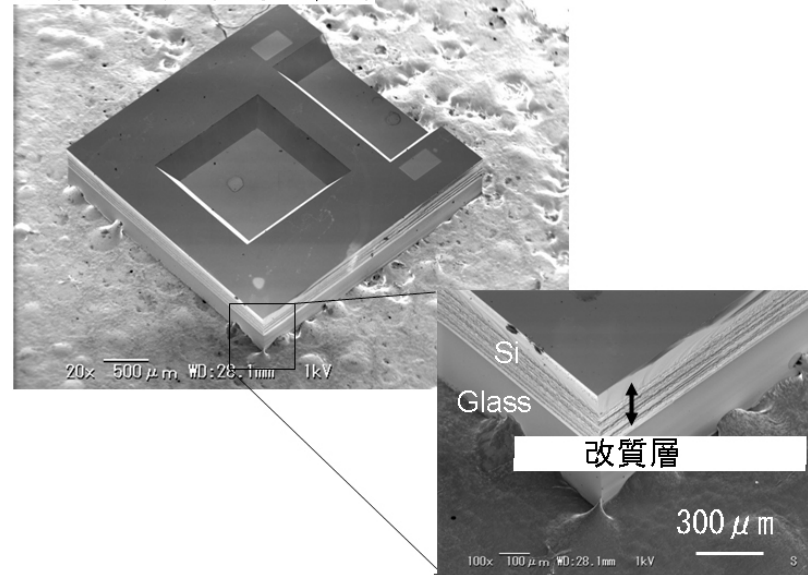
ステルスダイシング (浜松ホトニクス)

水をかけない分割
→ ごみが入る恐れのあるMEMS

切りしろの無い分割
→ IDタグチップのような小さなチップ



圧力センサ (ガラス/Si)



パイレックスガラス+Siのレーザダイシング
(レーザ総研、東北大)

(Y.Izawa, Proceedings of the 24th Sensor Symposium, Tokyo, (2007), 19-23)



仙台ステルスダイシングラボ

SD PROCESS FLOW FOR MEMS



2009.7月予定

テープマウント

ダイシング

チップ間拡張

フィルム硬化



テープマウント装置

真空貼付装置

タカトリ株式会社

NECエンジニアリング製

ステルスダイシング装置

MAHOHダイサー

ML200



装置: 東京精密製



SDエンジン: 浜松ホトニクス製

ウェハ拡張装置

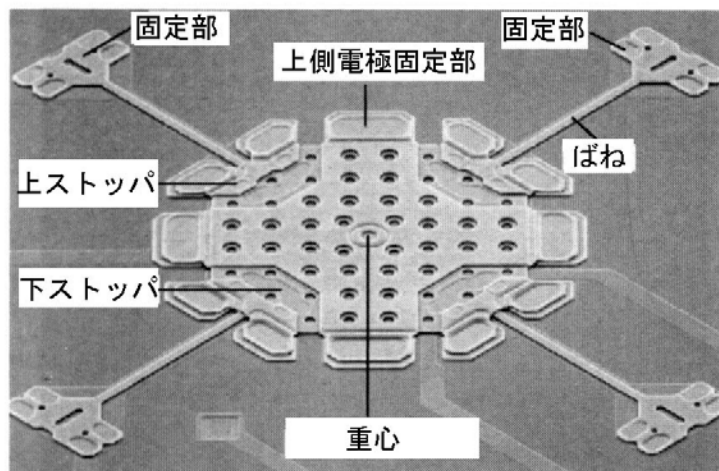
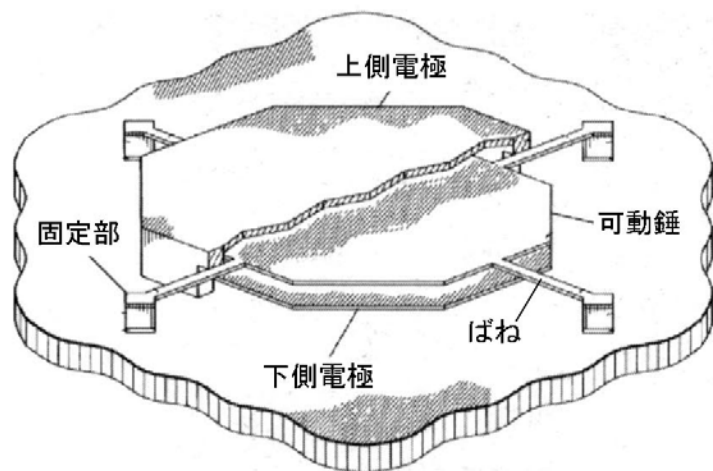
TEX-21

テクノビジョン製

UVフィルム硬化装置

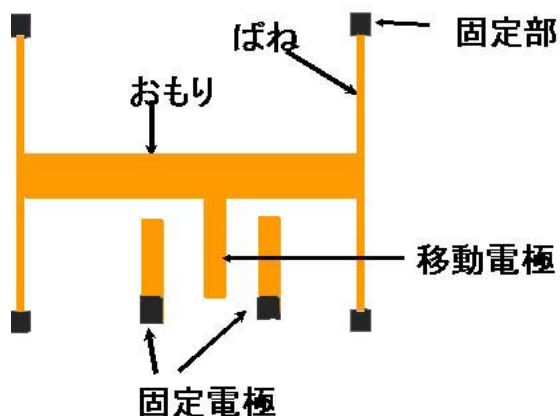
LED-408

テクノビジョン製

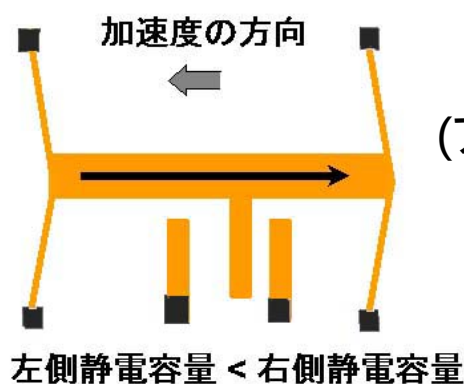


面外(垂直方向)動作 (静電容量 大、対象性 悪) (モトローラ社)

(F.Shemansky, Microsystem Technologies, 1 (1995) 121)

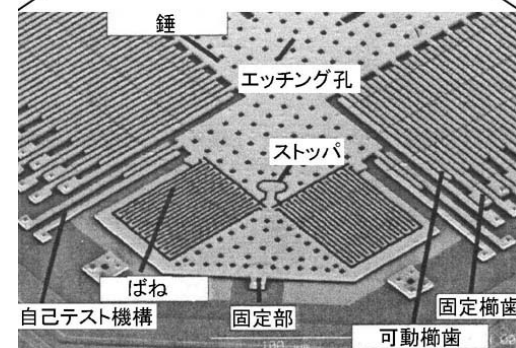
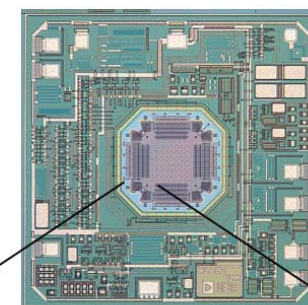


定常状態のセンサ



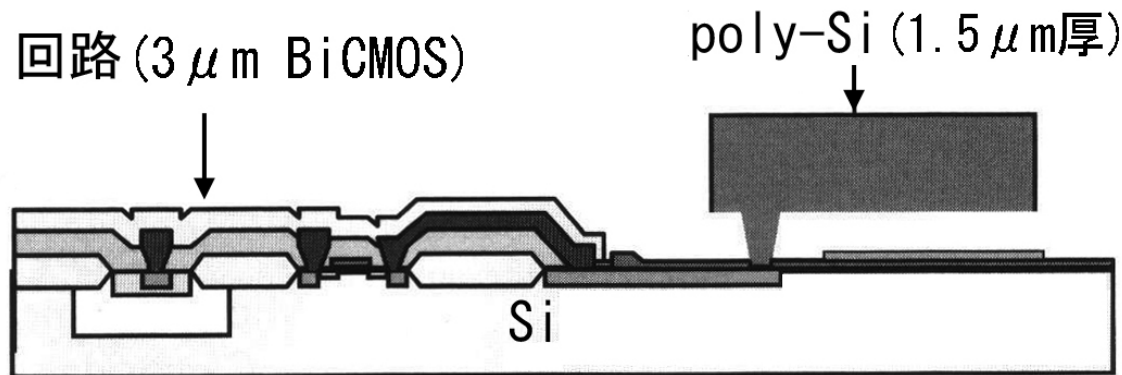
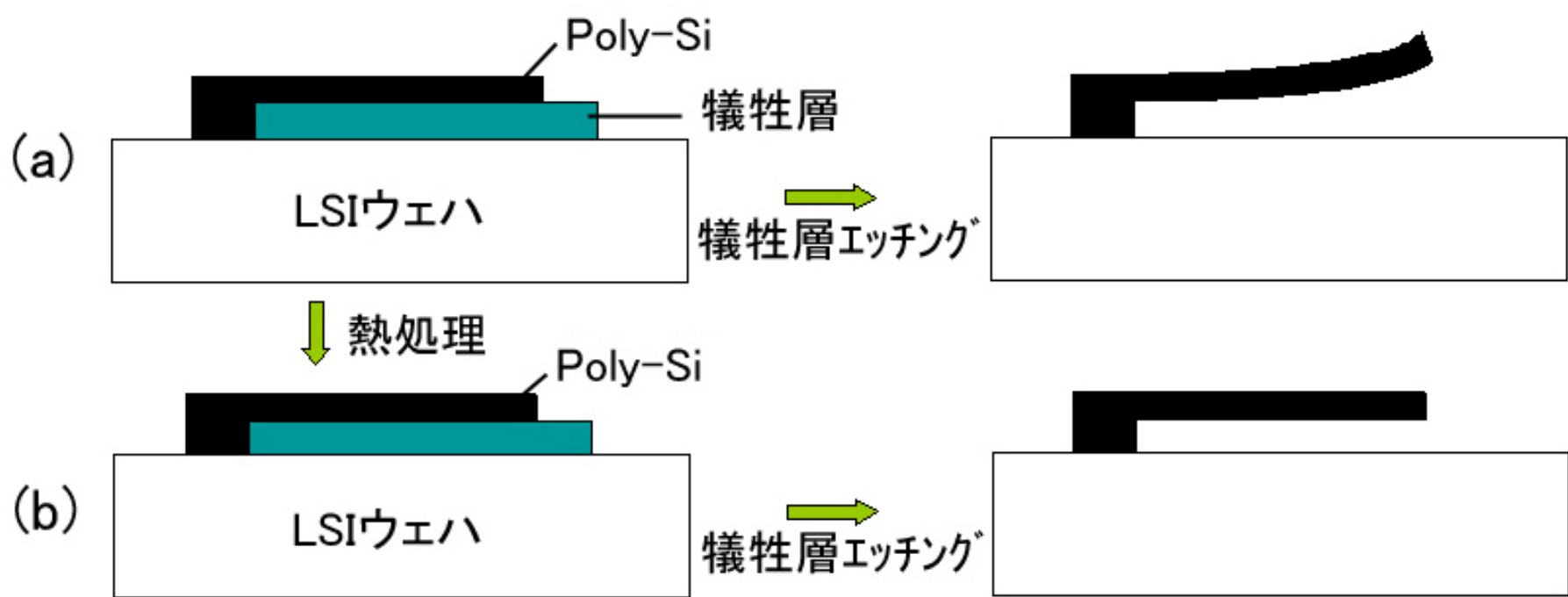
加速度印加状態のセンサ

(アナログデバイス社)



面内(水平方向)動作 (静電容量 小、対象性 良)

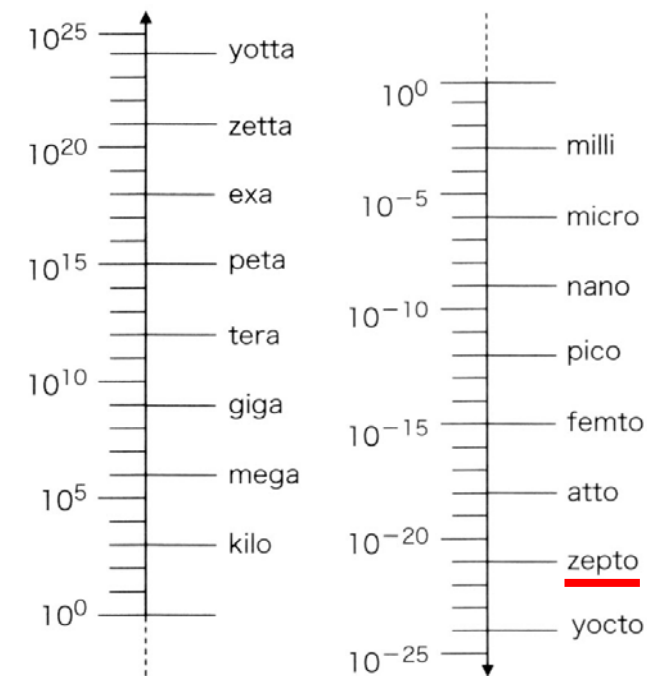
表面マイクロマシニングによる加速度センサ



加速度センサ(アナログデバイス)

ばねとして優れた構造のMEMSにするため、ポリシリコンの応力制御に 1100°C 、3hの熱処理が必要。このため、**微細回路の上には形成できない。**

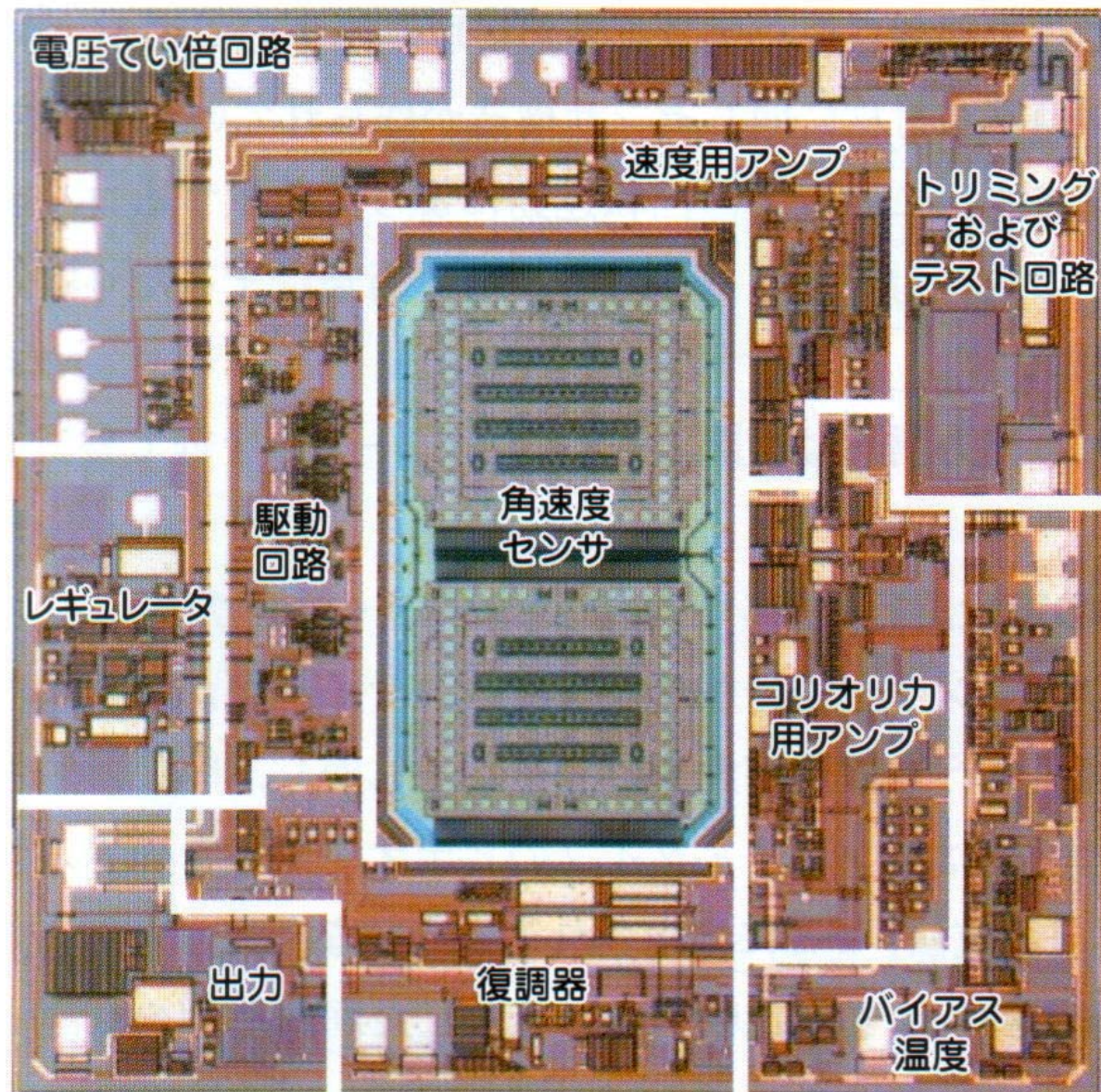
ばねとして機械的特性に優れたMEMSのための表面マイクロマシーニング



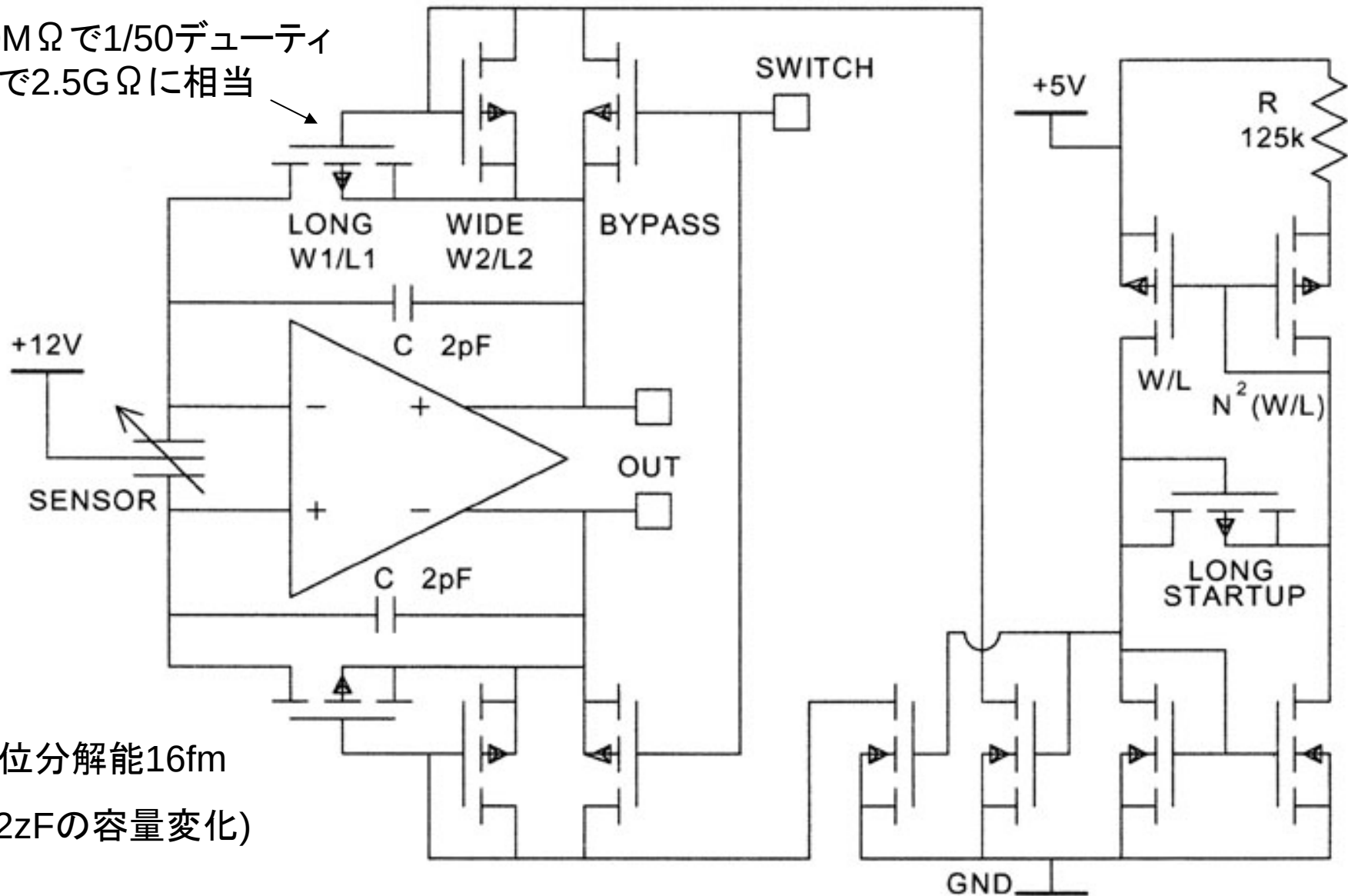
変位分解能16fm
(1/6,000 A)

(12zFの容量変化)

Poly-Siの表面マイクロ
マシニングによる集積
化振動ジャイロ
(Analog Device社 ADIS1650)



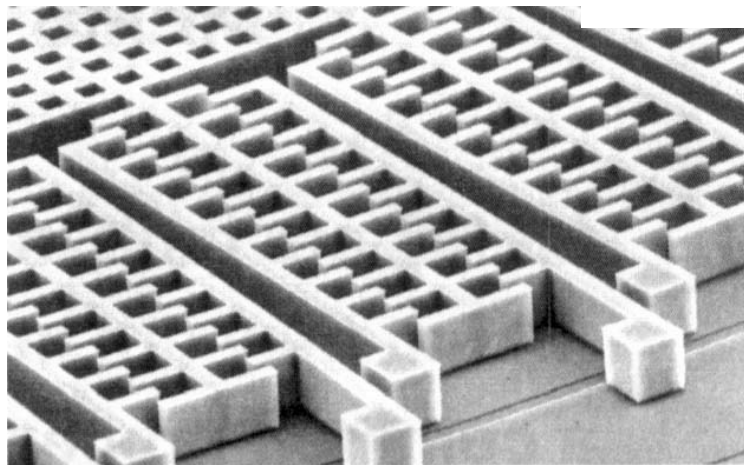
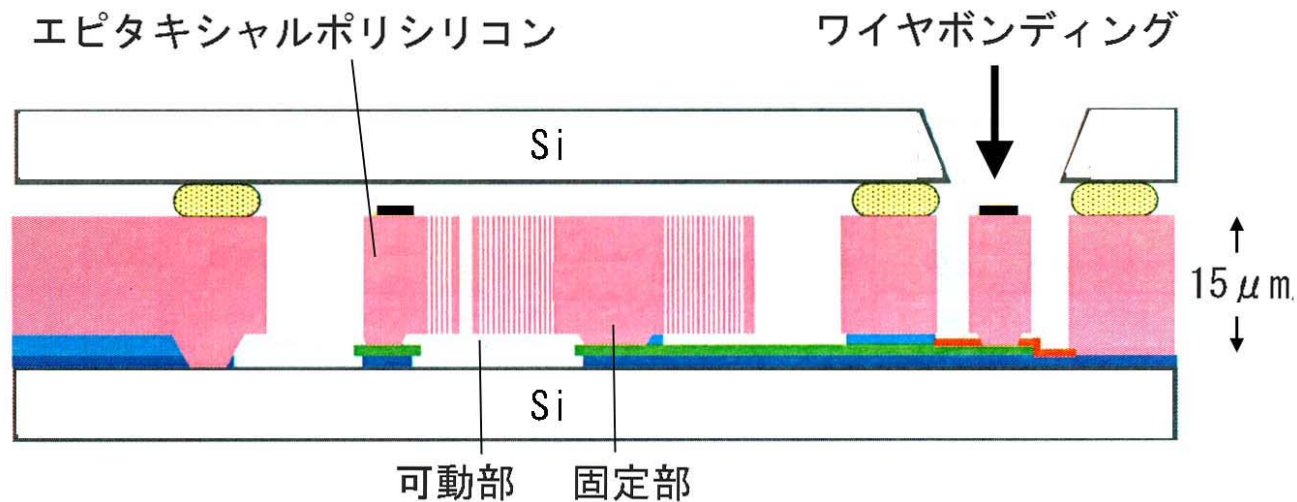
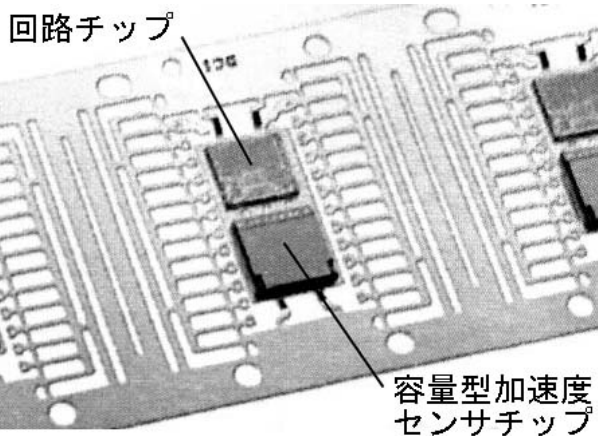
50M Ω で1/50デューティ
比で2.5G Ω に相当



変位分解能16fm
(12zFの容量変化)

集積化振動ジャイロ(アナログデバイスADIS1650)の容量検出回路

(J.A.Green et.al.,IEEE J. of Solid State Circuits, 37 (2002) 1860)

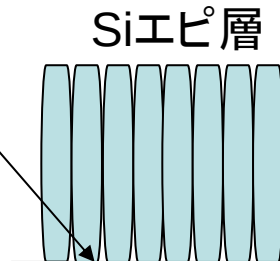


振動ジャイロのエピポリSi構造

ST and ADI accelerometers
power Nintendo controller



- ① SiO_2 上にLPCVDで核形成 (650°C) 125nm厚
- ② 減圧エピタキシャル成長炉を用いた厚いpoly-Si成長 (1000°C) 縦カラム状で低応力(3MPa)、堆積速度大 (0.4 – 0.7 $\mu\text{m} / \text{min}$)



低応力厚膜用のエピタキシャルポリSi

(M.Kirsten, B.Wenk (Fraunhofer-Inst.),
F.Ericson, J.A.Schweitz (Uppsala Univ.)
Thin Solid Films, 259 (1995) pp.181-187)

ST Microelectronicsの加速度センサ

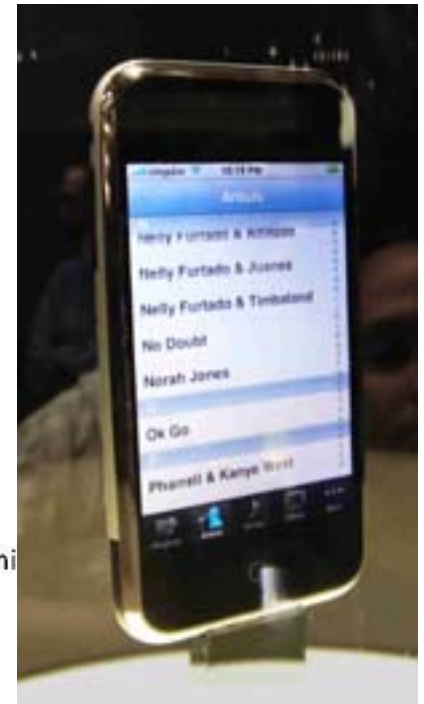
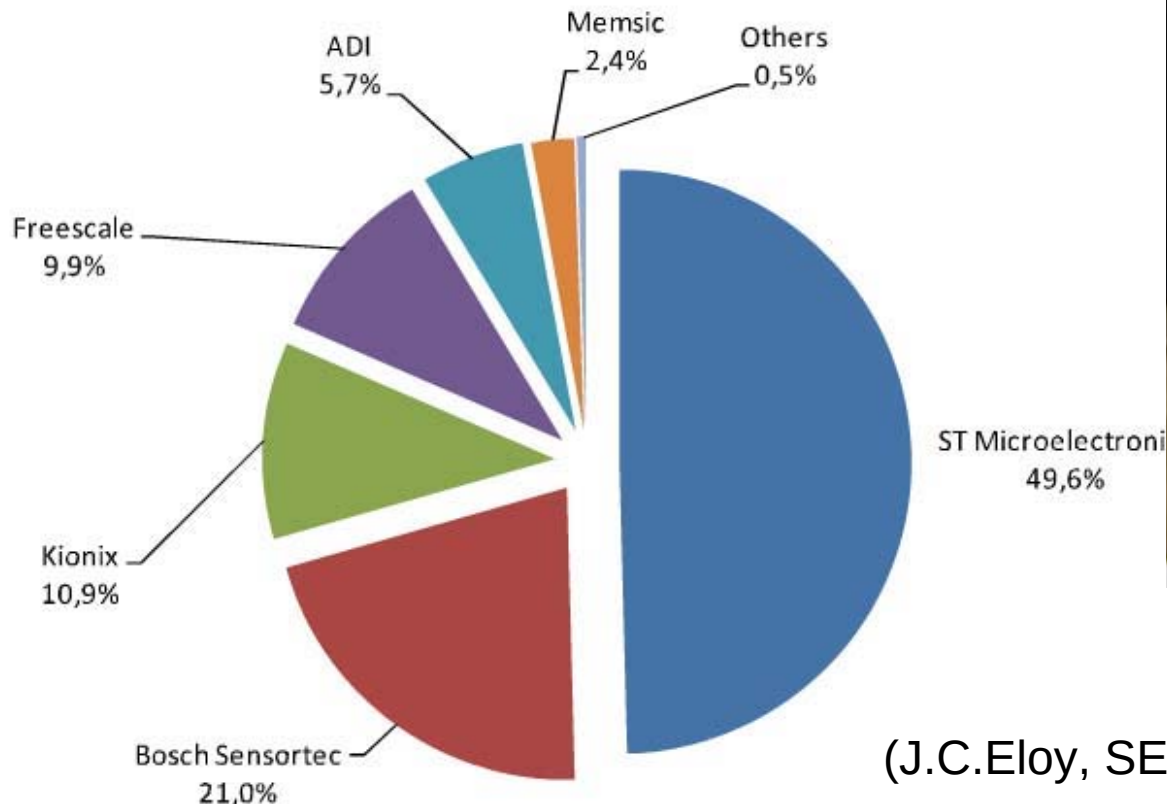
厚いポリシリコンを用いた横方向に動く容量型センサ

MEMS Accelerometer Market Share:

STM and Bosch are competing..

- **ST Microelectronics and Bosch Sensortec are leading the handset accelerometer market**
 - In units it is estimated that ST market shares are even slightly higher, due to their low pricing

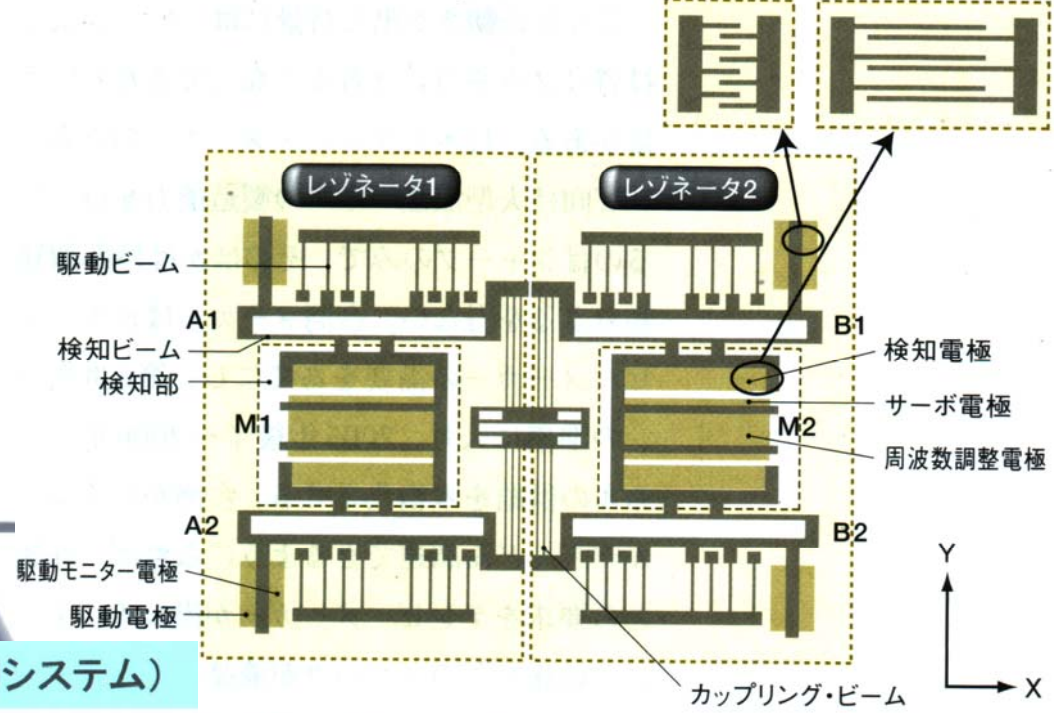
2009 MEMS accelerometer market share for mobile phones (% in value)
(total: \$223M)



(J.C.Eloy, SEMICON Japan 2010)

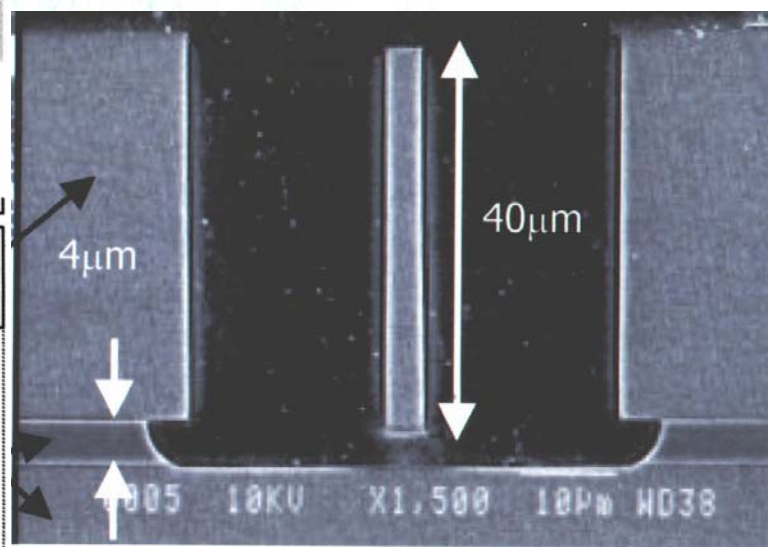


半導体式ヨーレートセンサーを搭載したクラウン(2003年12月発売)



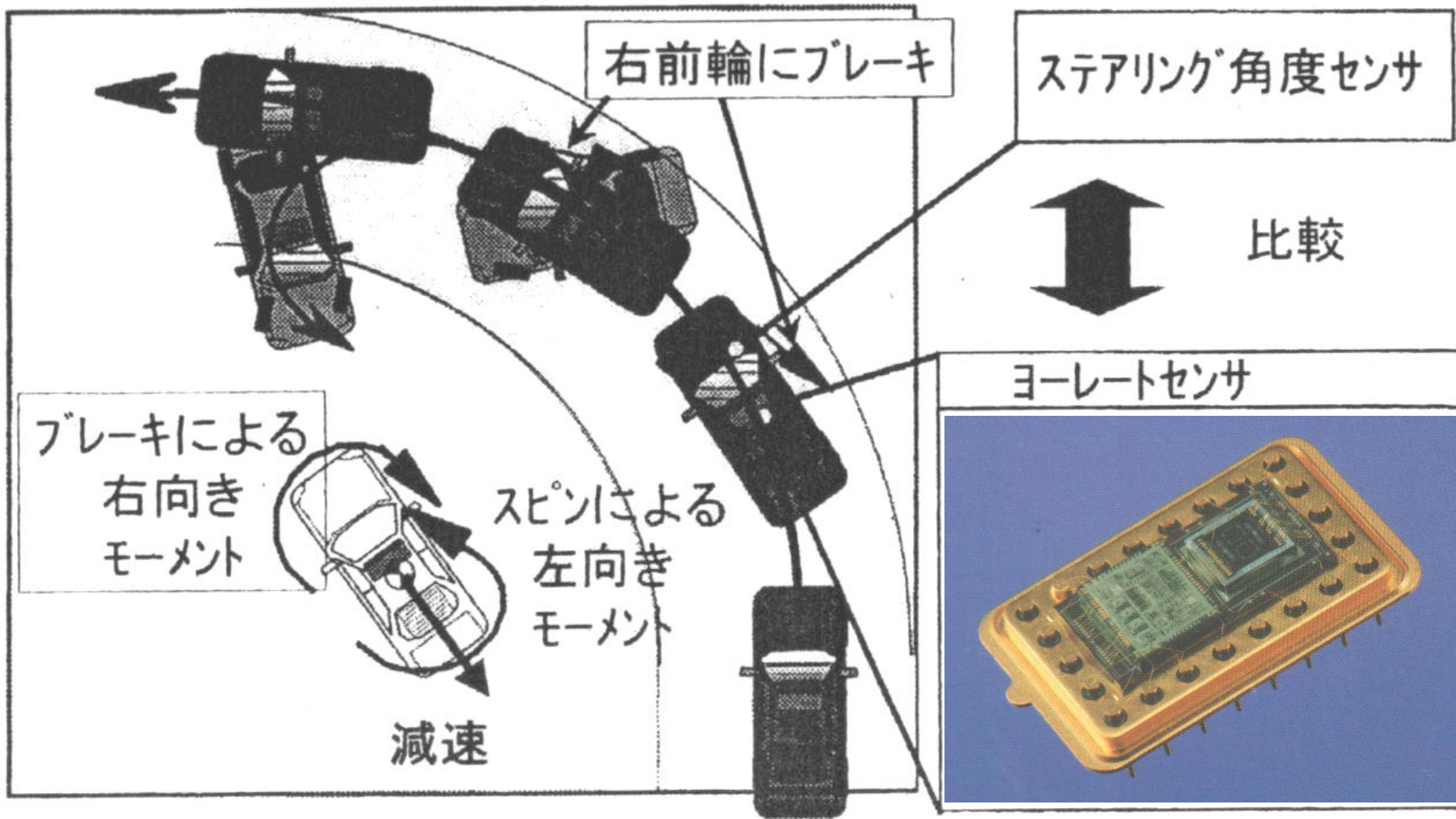
VSC (Vehicle Stability Control: 車両安定性制御システム)

開発経緯		
マイクロマシニング技術の車両応用を目指し、92年から東北大学との共同研究実施。引続き社内開発を行い、03年、世界で初めて製品化。		
92 95 00		
先端研究と人材育成 (東北大学・トヨタ自動車共同)	先行開発 (トヨタ自動車)	製品開発 (トヨタ自動車)
ヨーレートセンサの半導体化研究 (原理確認)	マイクロマシニング 技術開発	車載性能実現、 低コスト化への製品開発
- 江刺研究室との共同研究 - 社員派遣による、 - マイクロマシニング技術修得 - 人材育成と人脈形成	- 高アスペクト比 マイクロ加工技術 - 高精度静電 容量検出技術 等	- 加速度センサー一体化 - 耐環境性能確保 等

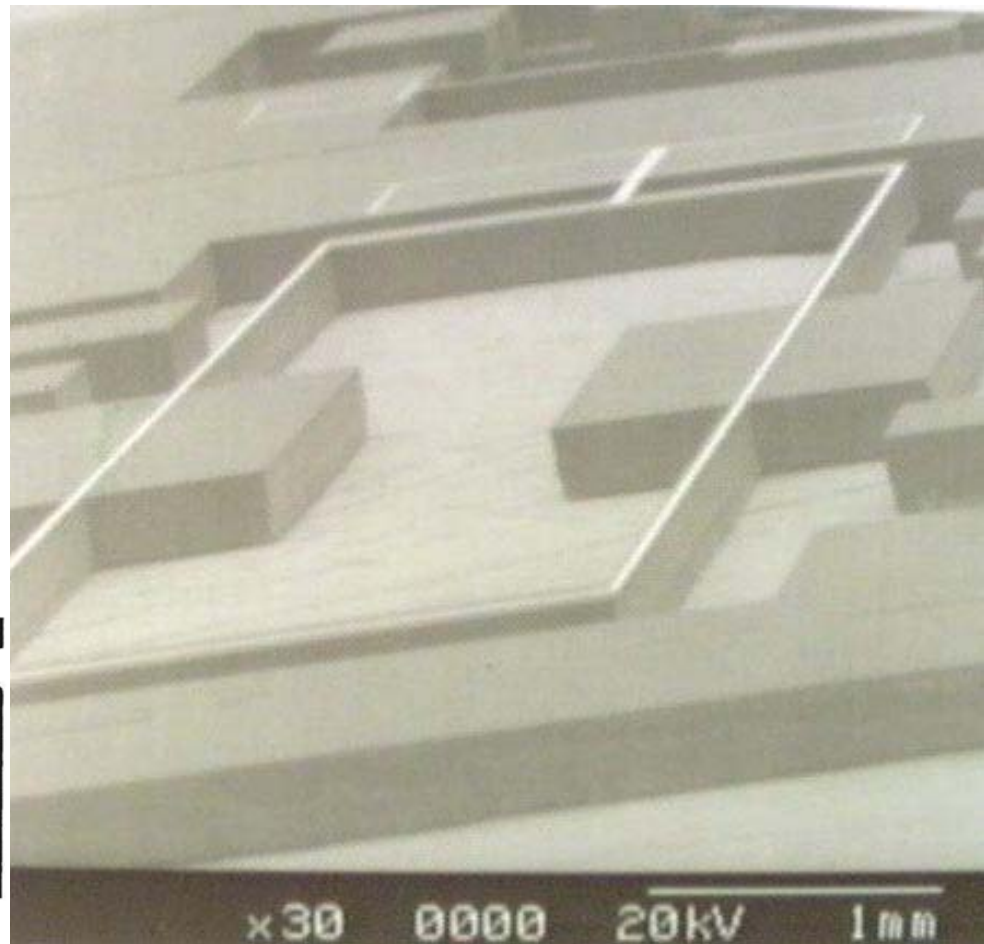
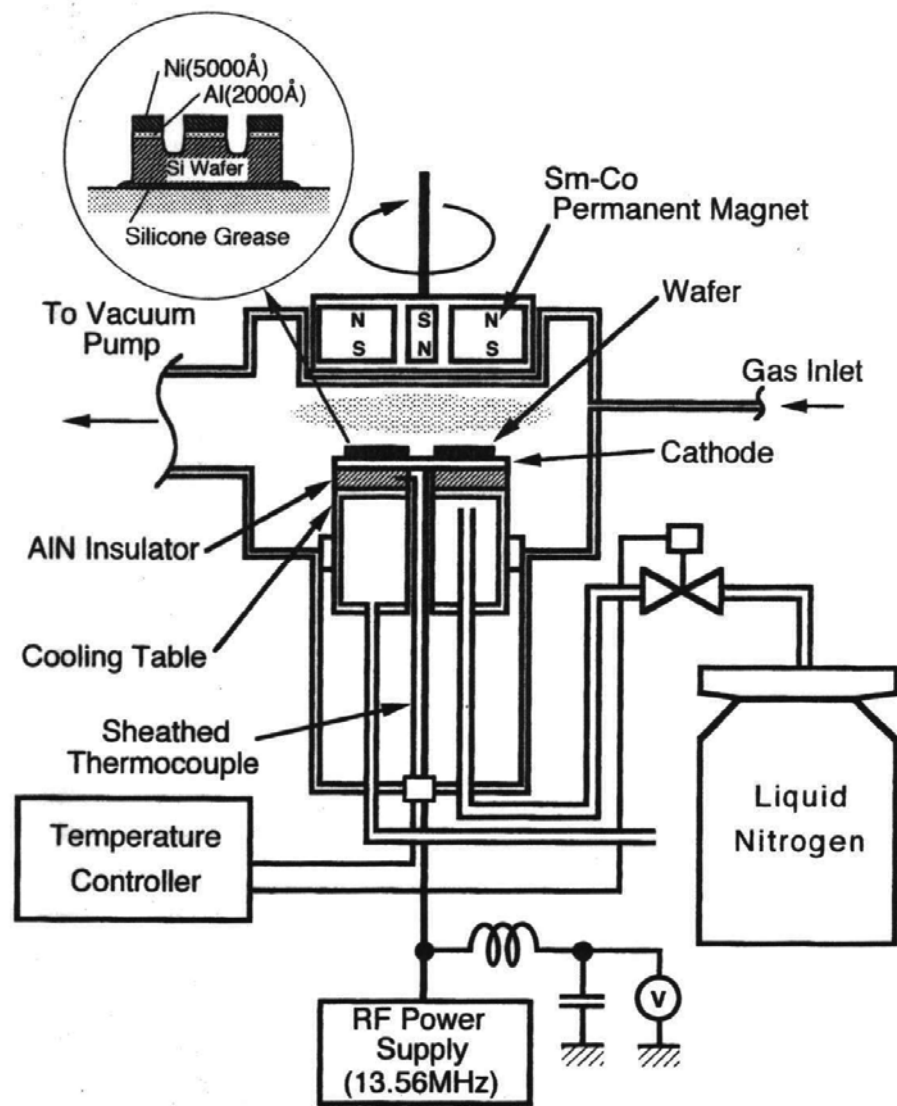


(M.Nagao et.al., SAE World Congress, Detroit, (2004))

加速度センサー内蔵 半導体式ヨーレートセンサー



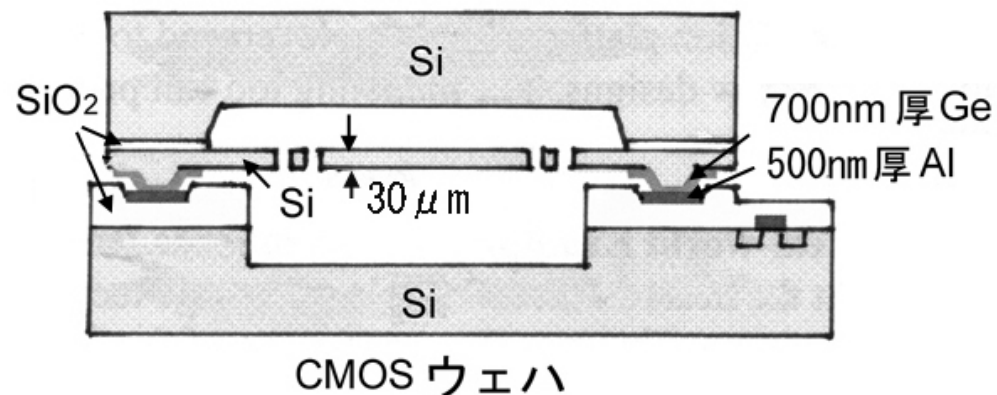
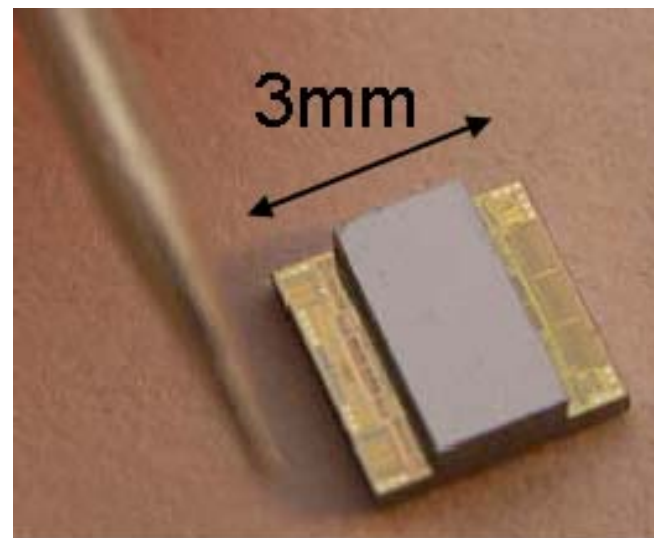
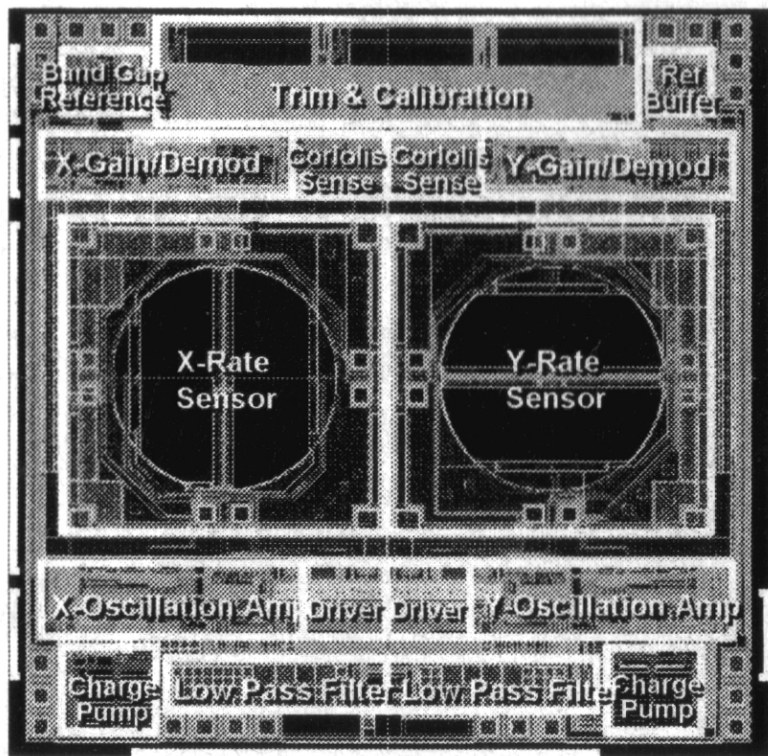
自動車の走行安定性を向上させるヨーレートセンサ (ジャイロ)



Deep RIEで加工した電磁駆動容量検出シリコン振動ジャイロ

Si deep RIE システム

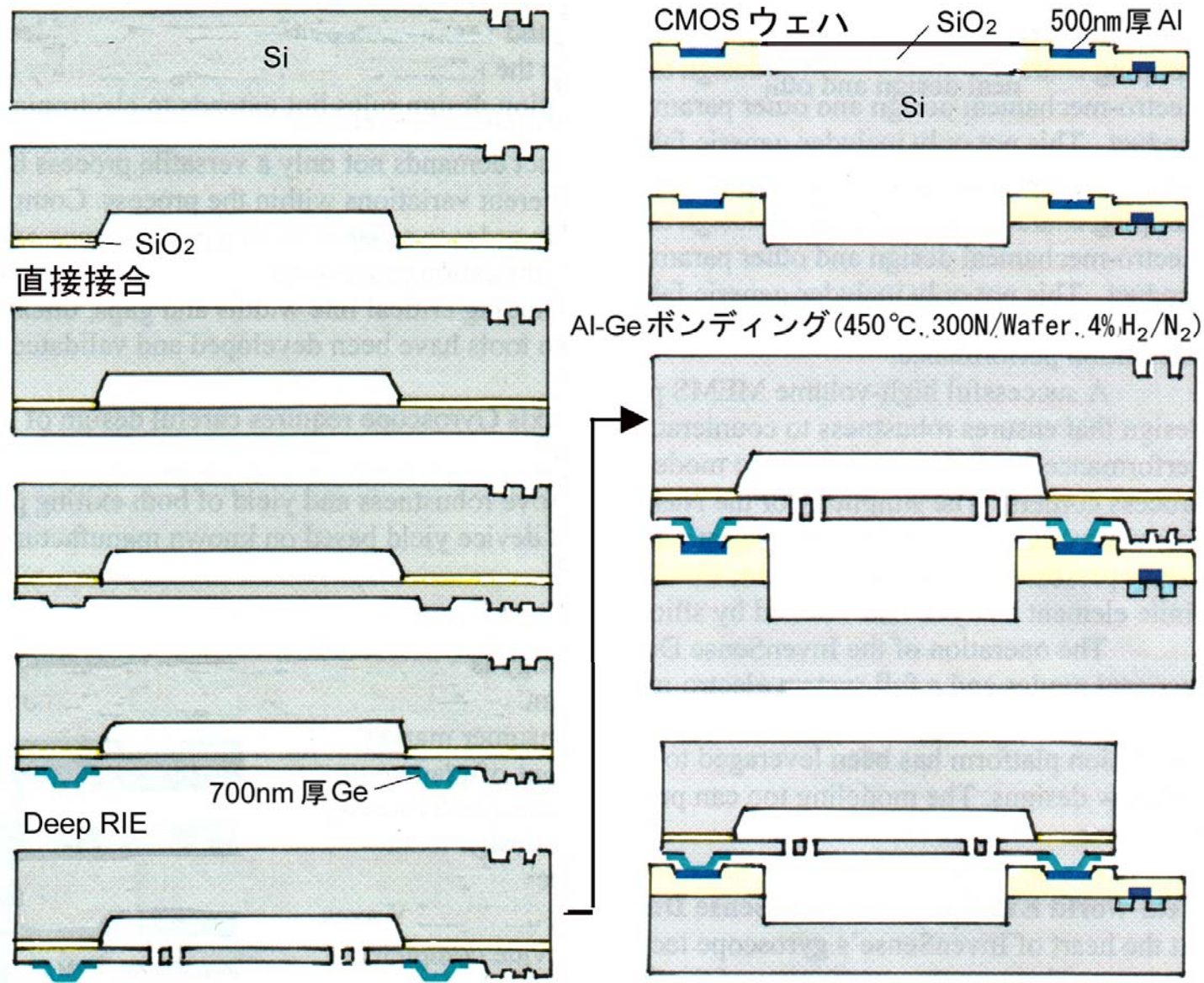
(M.Takinami, 11th Sensor Symposium, (1992) p.15)



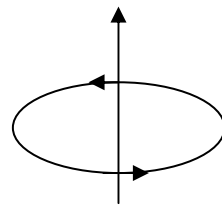
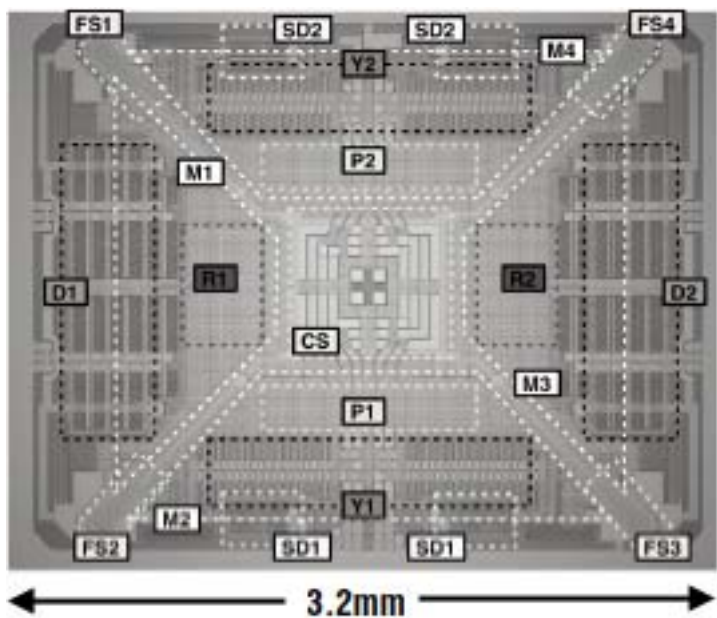
手ぶれ防止とインベンセンス社の2軸角速度センサ (IDG-1000)

カメラの手振れ防止へのジャイロ (角速度センサ) の応用

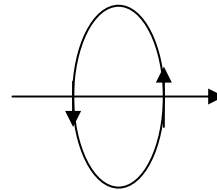
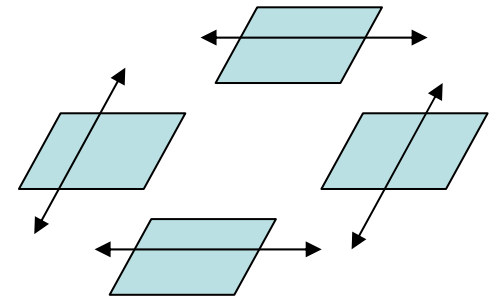
(J.Seeger, M.Lim and S.Nasiri : Technical Digest Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, Hilton Head Island, 61 (2010))



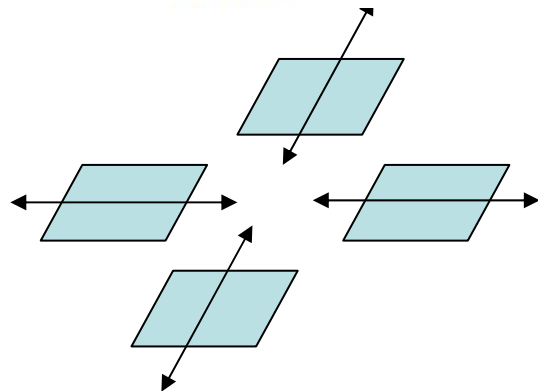
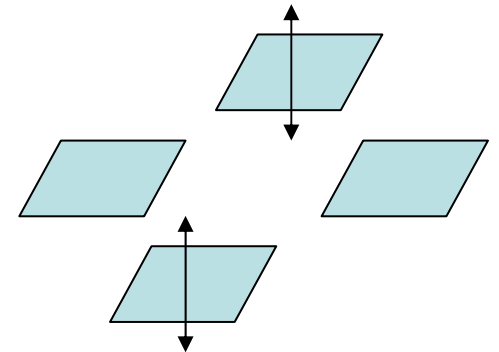
Ge-Alの共晶接合による集積化振動ジャイロの製作工程



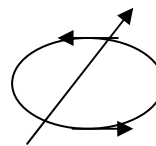
Yaw



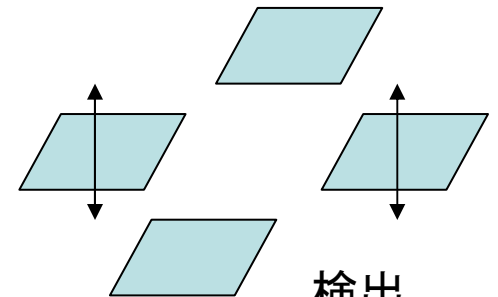
Pitch



駆動



Roll



検出

3軸振動ジャイロ(STマイクロエレクトロニクス)とその原理

(L.Prandi (ST Microelectronics) ISSCC 2011, p.104)

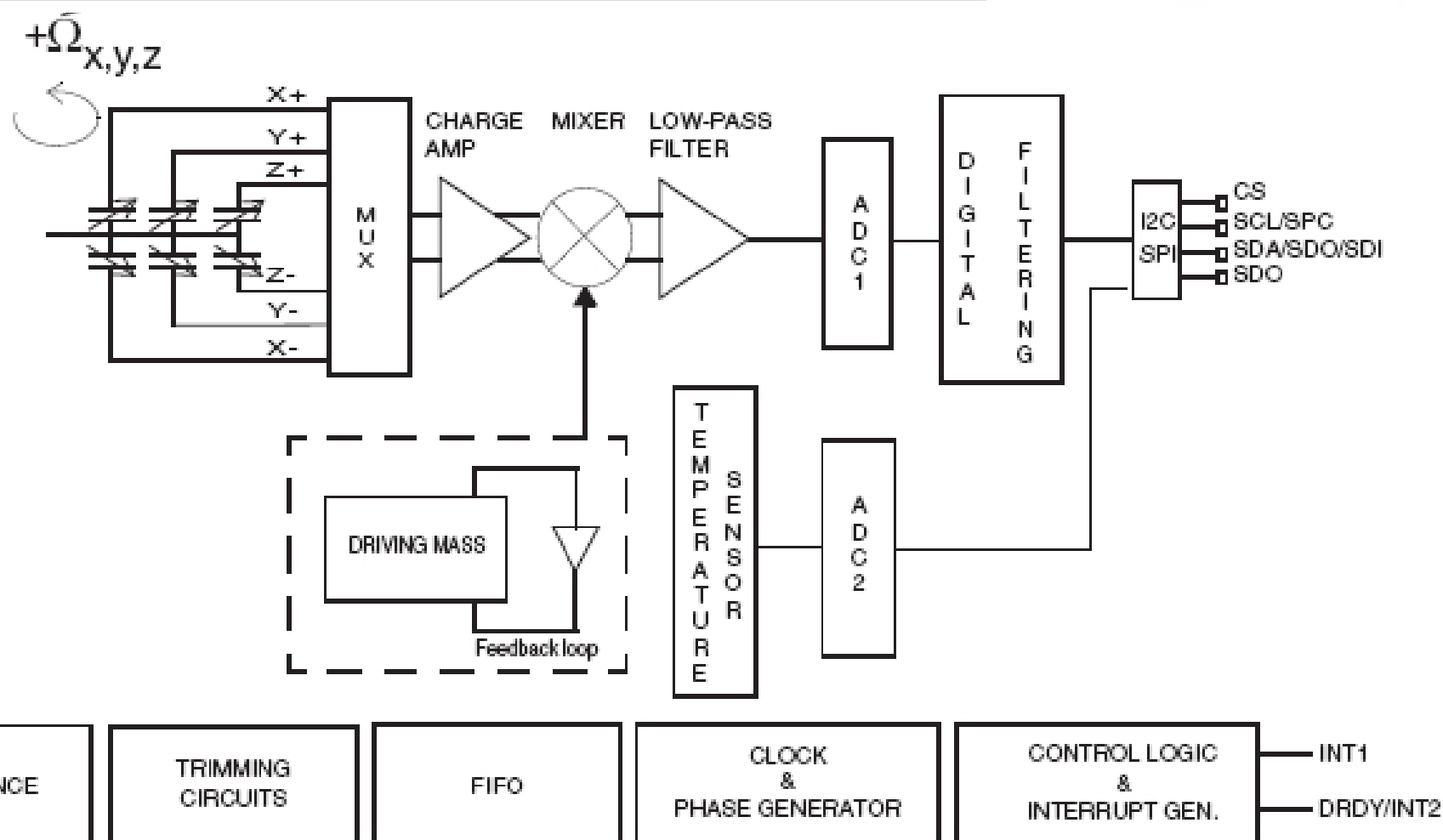


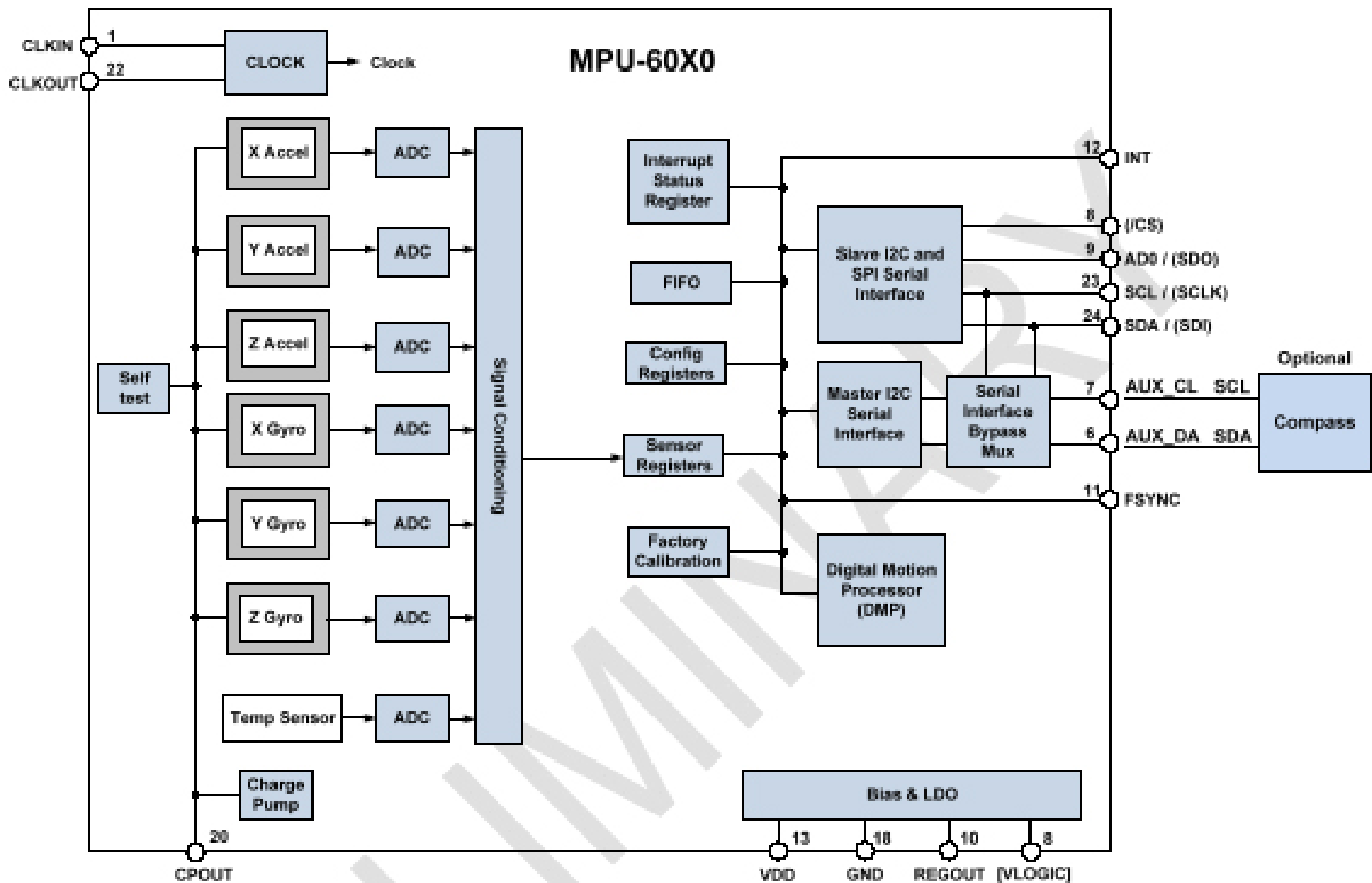
L3G4200D



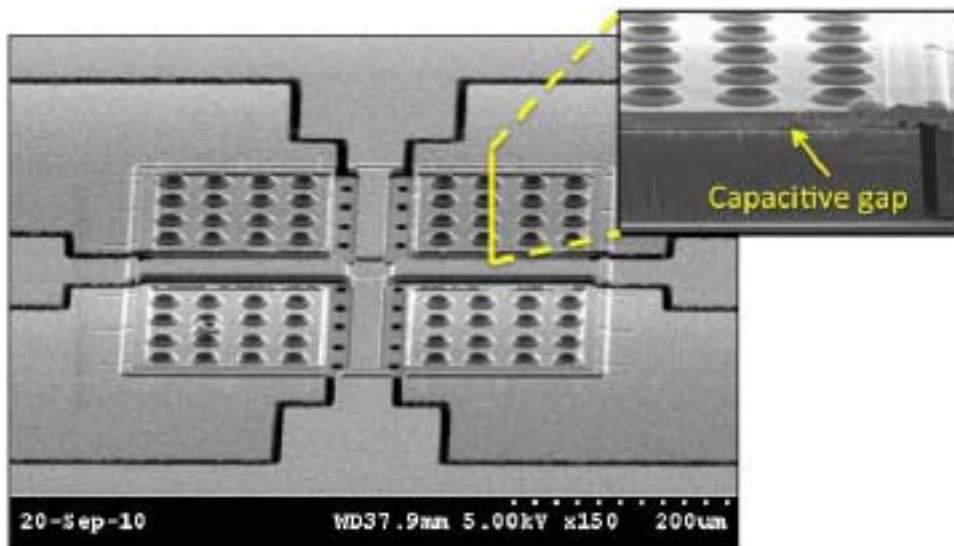
MEMS motion sensor:
ultra-stable three-axis digital output gyroscope

LGA-16 (4x4x1.1 mm)

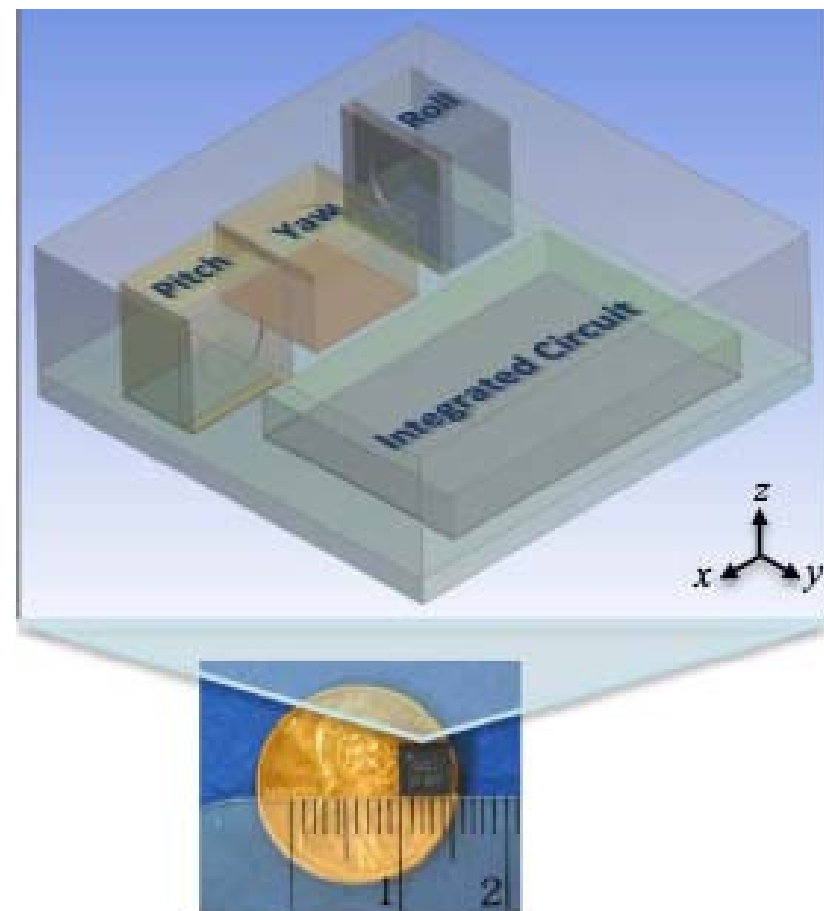




インベンセンス社のConboセンサ(3方向加速度+3軸ジャイロ+方向センサ(Compass))



3方向加速度センサ

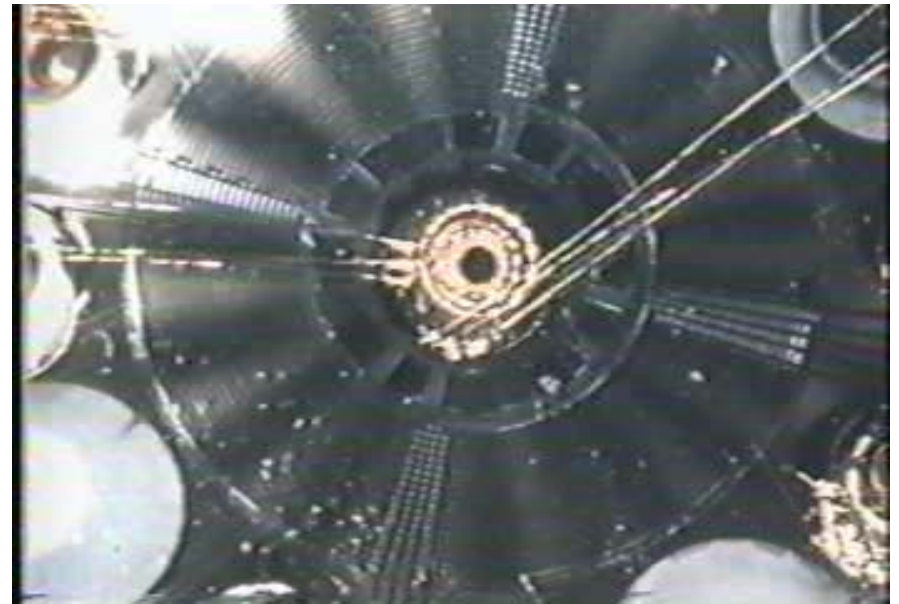
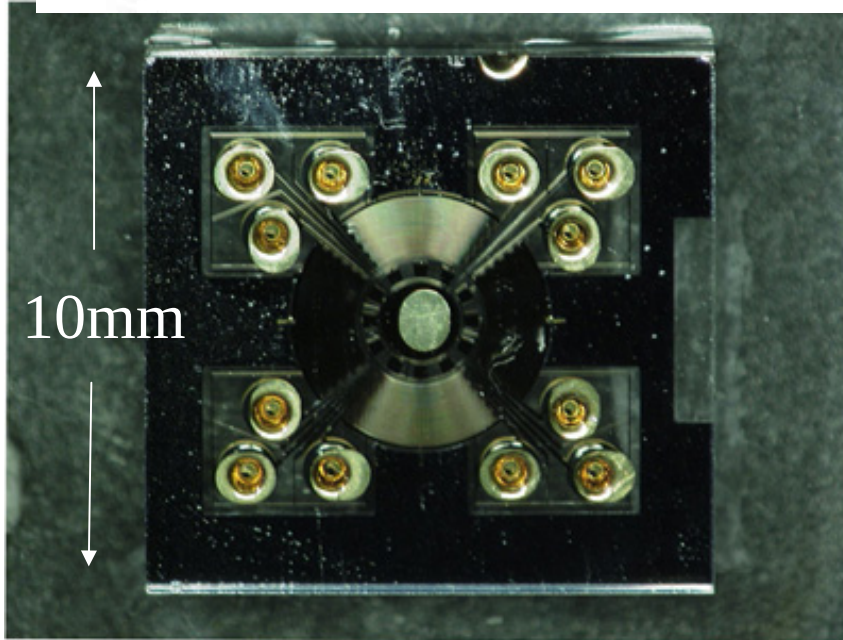
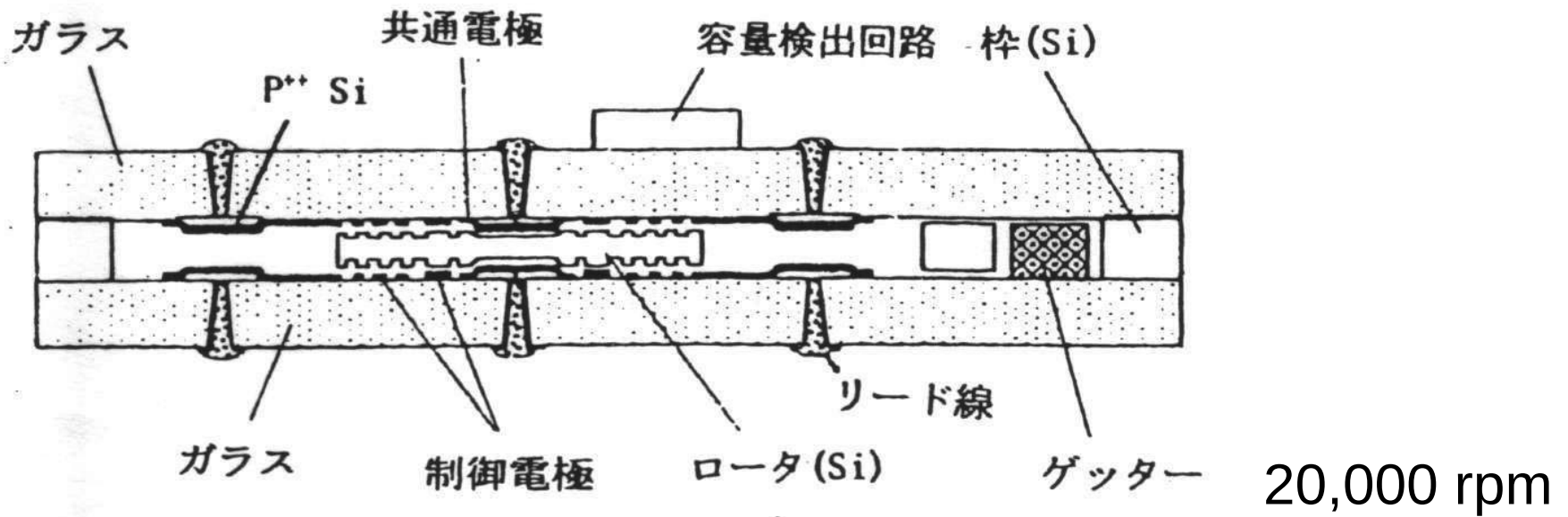


3軸BAW(Bulk Acoustic Wave)
ジャイロ

共振周波数大0.9MHz→超小形

IMU (Inertial Measurement Unit)
3方向加速度、3軸ジャイロセンサ

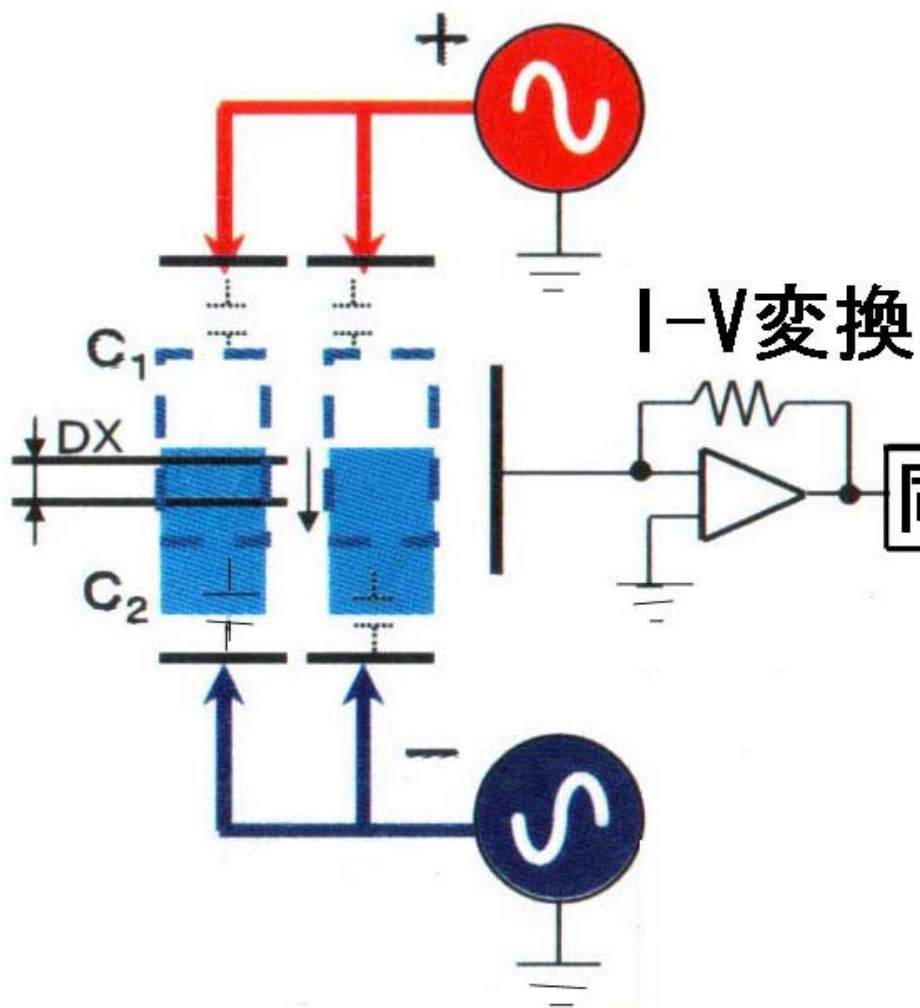
(F.Ayazi (Georgia Tech., Transducers '11, 2805)



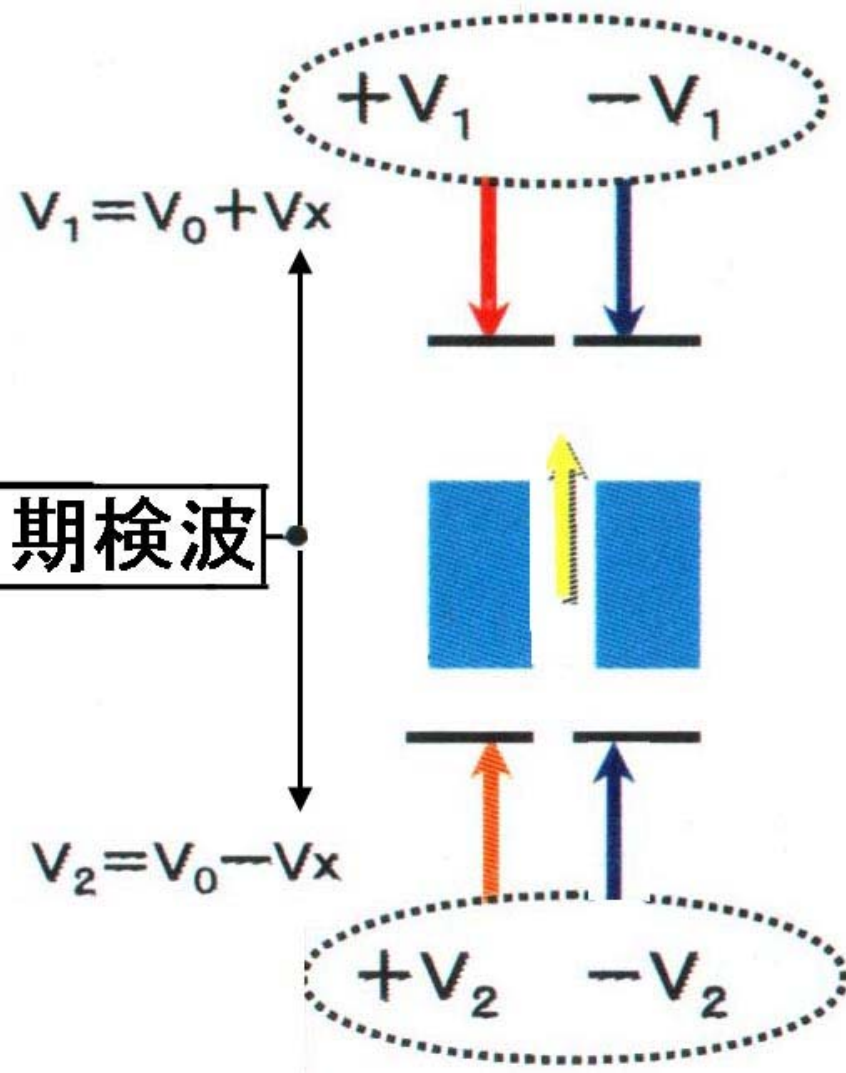
静電浮上回転ジャイロ用(ディスク型)

(T.Murakoshi (Tokimec Inc.) et.al., Transducers'99)

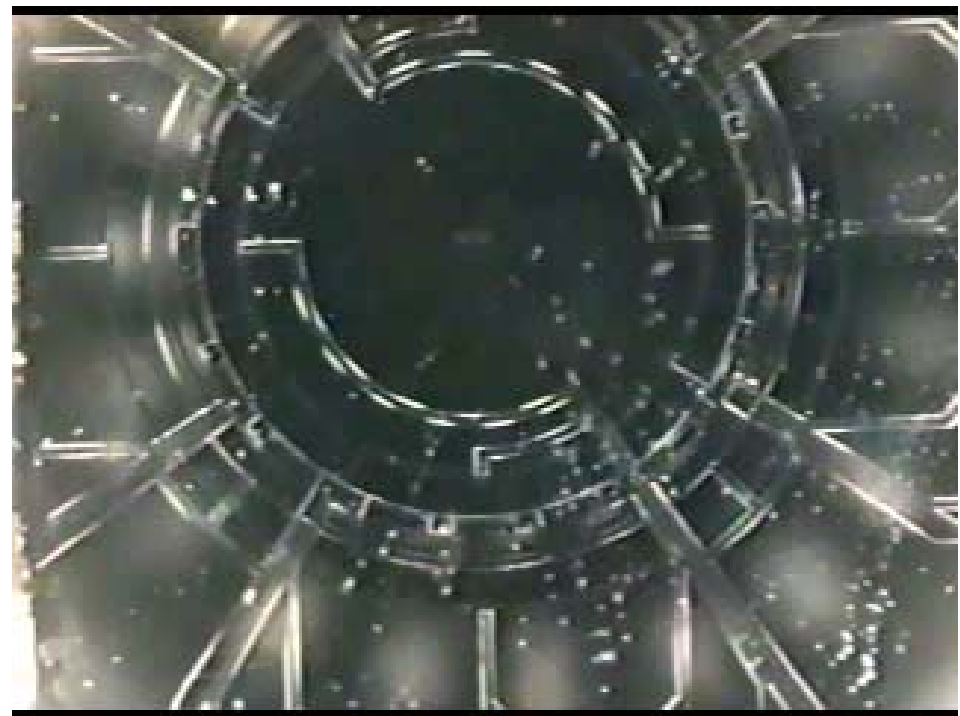
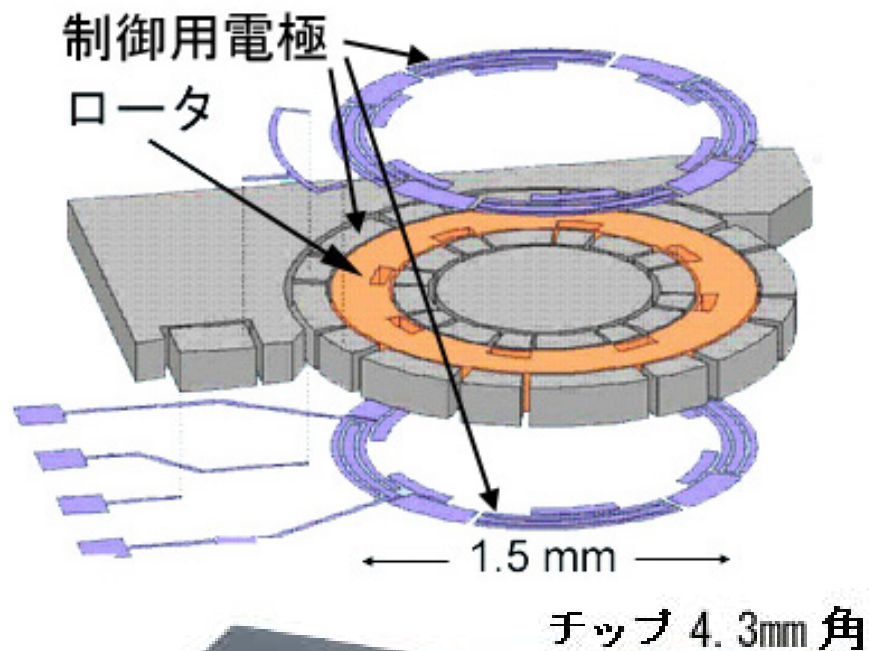
変位の検出



静電力フィードバック



静電浮上の原理



ロータ径1.5mm 毎分7.4万回転

静電浮上回転ジャイロ

(高速デジタル制御で静電浮上・回転)

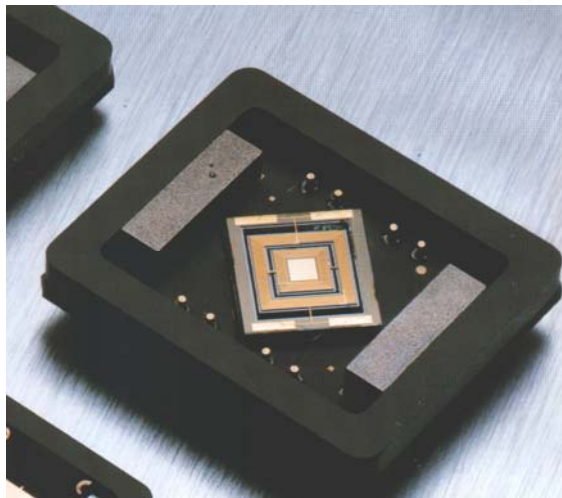
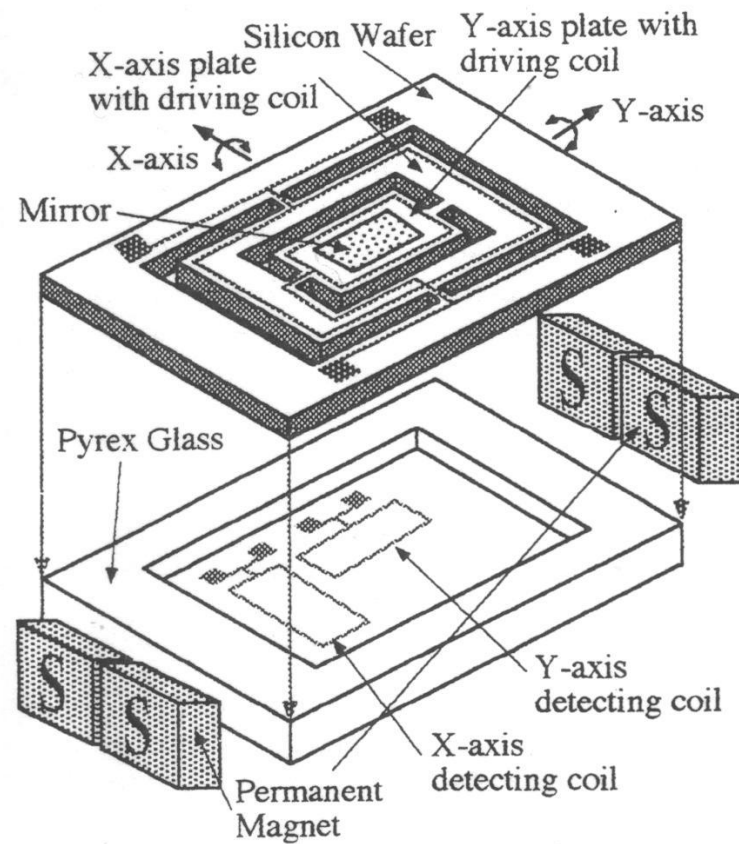
(東京計器(株) **KEIKI** TOKYO 村越尊雄 氏、中村茂 氏)

MESAG-100 (Micro Electrostatically Suspended Accelerometer Gyro)

運動制御や航行制御、自立運動ロボットなど (2軸回転と3方向の加速度を高精度同時検出)
(T.Murakoshi, Jpn. J. Appl. Phys., 42, Part1 No.4B (2003) p.2468)

ECO SCAN

MEMS技術を利用した共振ミラー“エコスキャン”



1次元タイプ One-dimensional type		2次元タイプ Two-dimensional type	
ミラーサイズ 5×6mm	Mirror size : 5x6mm	ミラーサイズ 4×4mm	Mirror size : 4x4mm
振幅 ±34度 (光学角)	Amplitude : ± 34 degrees (Optical angle)	振幅 ±6度 (光学角)	Amplitude : ± 6 degrees (Optical angle)
共振周波数 500Hz	Resonant frequency : 500 Hz	共振周波数 4kHz	Resonant frequency : 4 kHz
		共振周波数 外側軸 350Hz 内側軸 1.5kHz	Resonant frequencies : Outside axis : 350 Hz Inside axis : 1.5 kHz

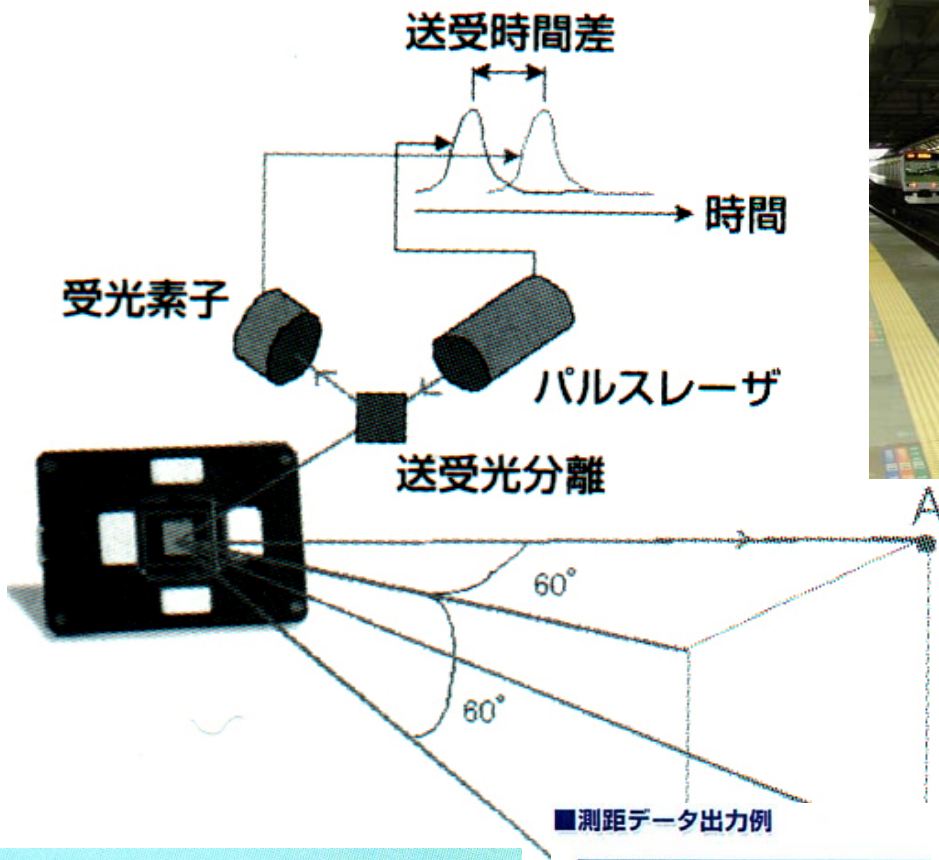
2003年10月現在 As of October 2003

2軸電磁駆動光スキャナ
(N.Asada et.al., IEEE Trans.
on Magnetics 30 (1994))

NIPPON SIGNAL

日本信号株式会社

ビジョナリービジネスセンター MEMS事業推進部

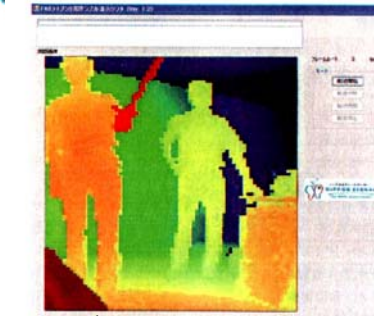


恵比寿駅

距離画像センサ



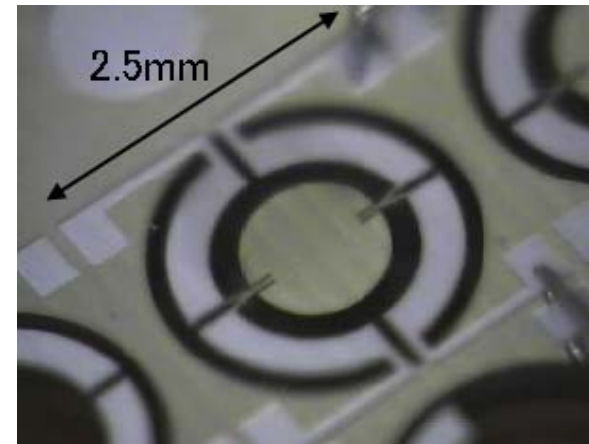
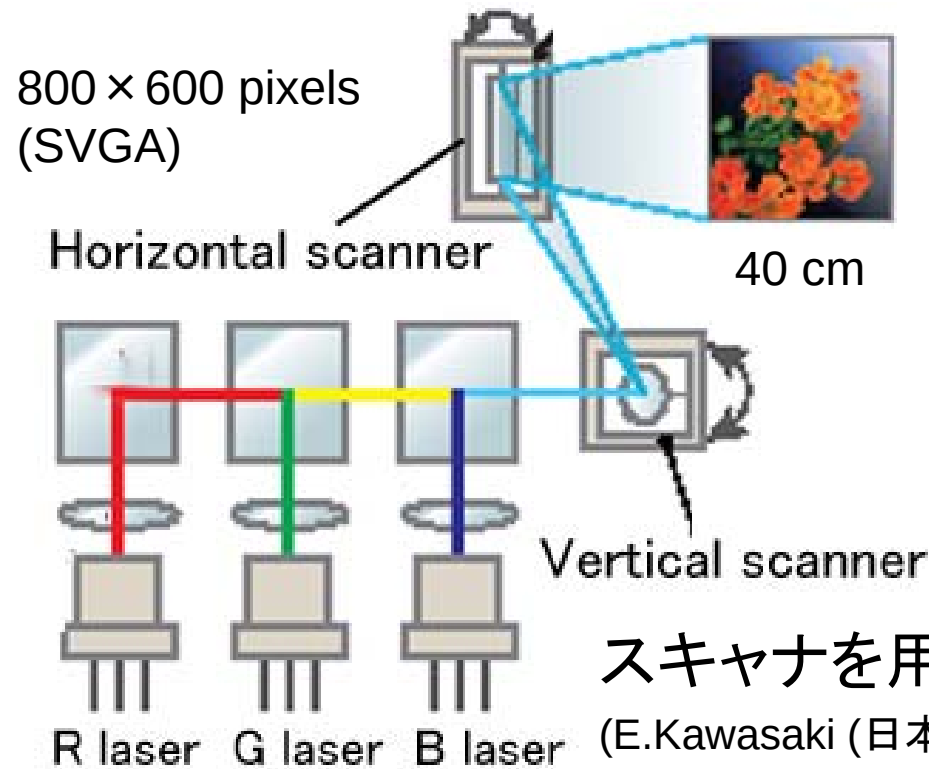
羽田空港第1ビル



色が距離に対応

3次元距離画像センサ

(石川智之、日本信号技報、33、1 (2009) 41) 36



圧電光スキャナ

(H.Matsuo, Y.Kawai and M.Esashi : Jap. J. Appl. Phys, 49 (2010) 04DL19)

スキャナを用いたレーザモバイルプロジェクト

(E.Kawasaki (日本信号), H.Yamada and H.Hamanaka : IDW'09 (2009) 1345)

LD MO (Liquid Delivery Metal Organic) CVD

PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$) 650 °C、 PbTiO_3 300 – 500 °C

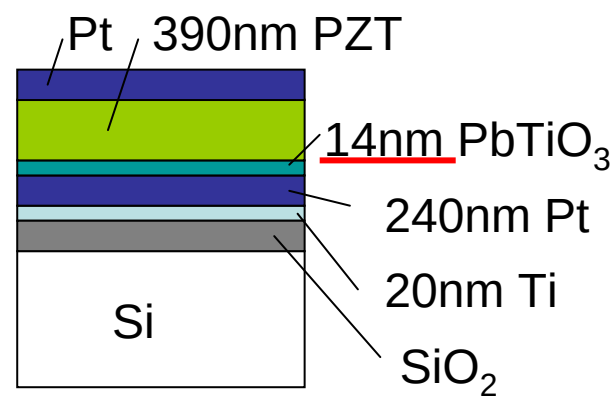
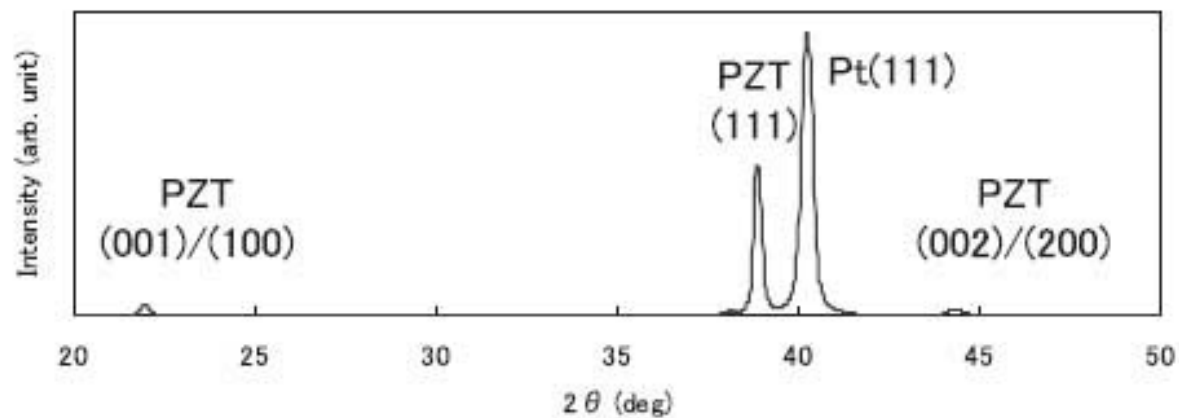
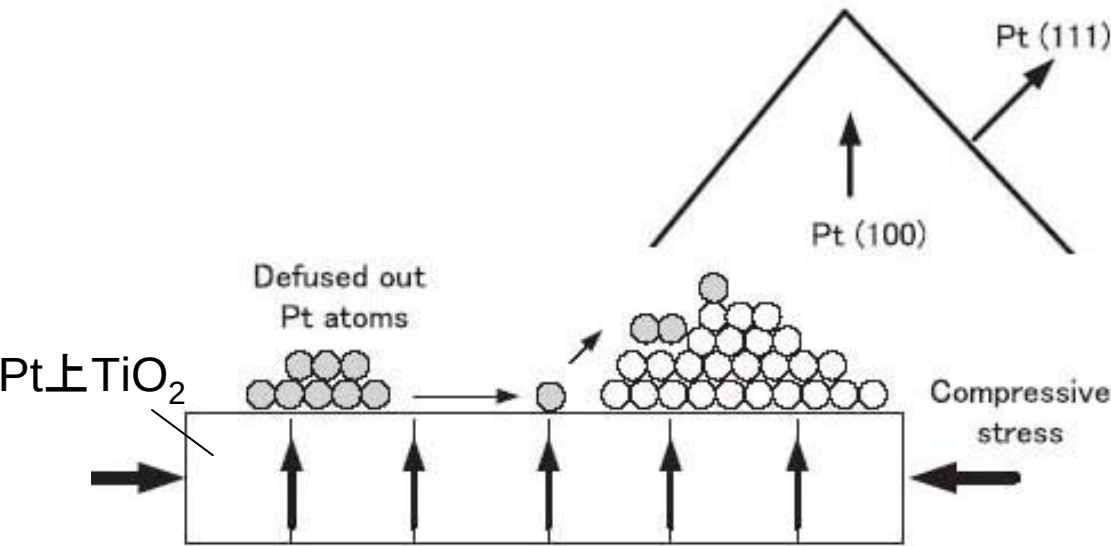


Fig. 7. XRD pattern of the (111)-oriented PZT. The thicknesses of PZT and Pt are 390 and 240 nm, respectively. Ti/Pt is not annealed. PbTiO_3 is deposited at 300 °C and the thickness is 14 nm.

111配向したPZT膜

Ti-Pt電極形成後の700°C 熱処理によるPt (100)



(H.Matsuo, Jap. J. Appl. Phys, 49 (2010) 061503) 38

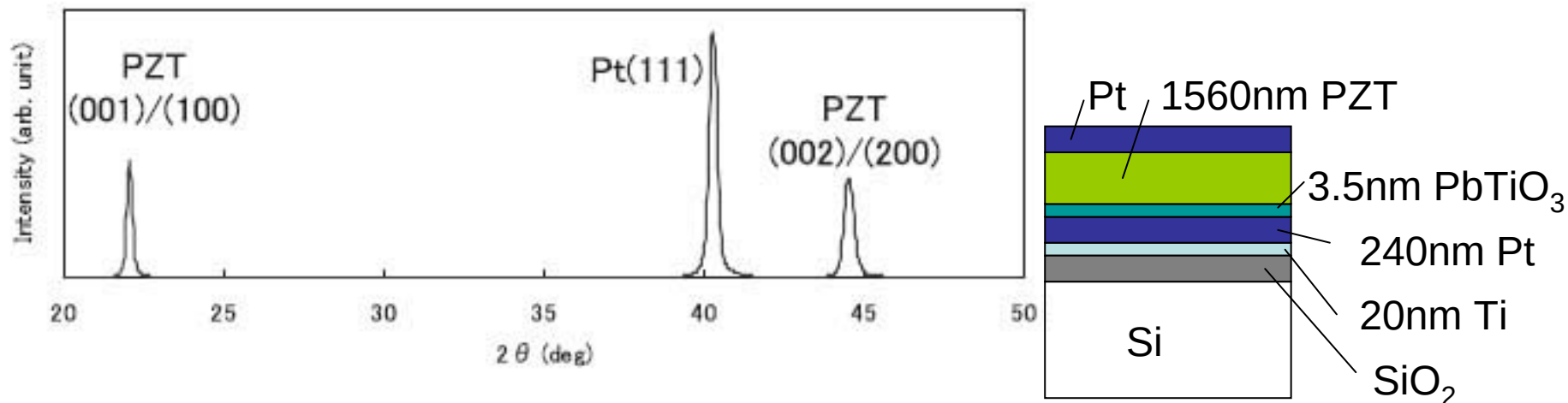
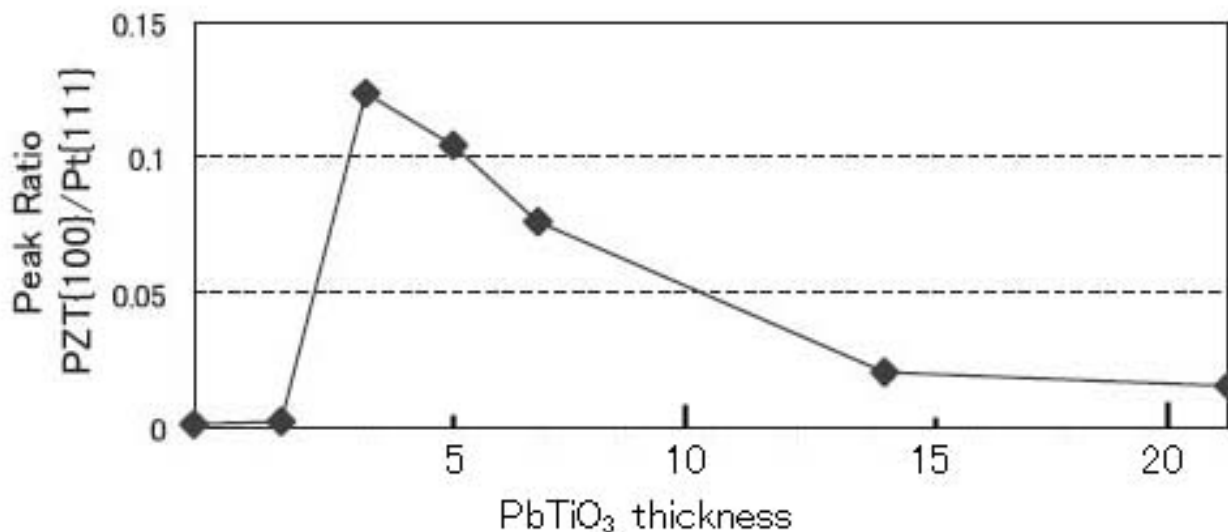


Fig. 6. XRD pattern of the thick PZT. The thicknesses of PZT and Pt are 1560 and 240 nm, respectively. Ti/Pt is annealed at 700 °C. PbTiO₃ is deposited at 500 °C and the thickness is 3.5 nm.

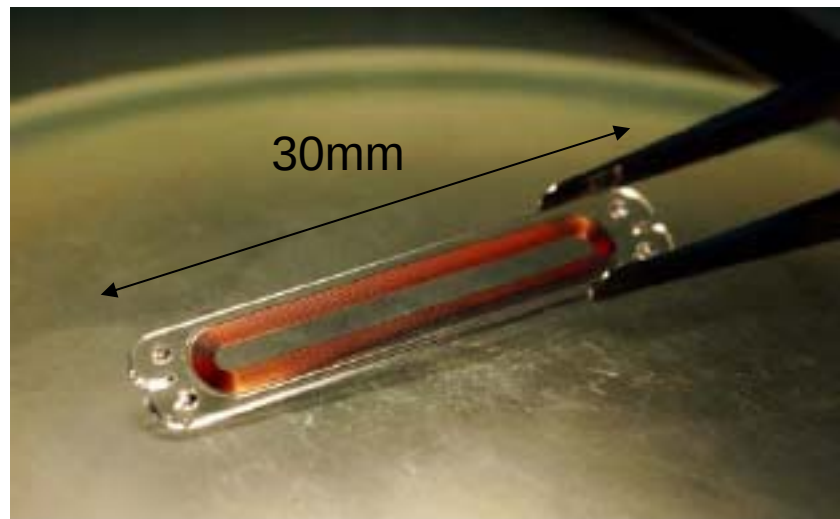
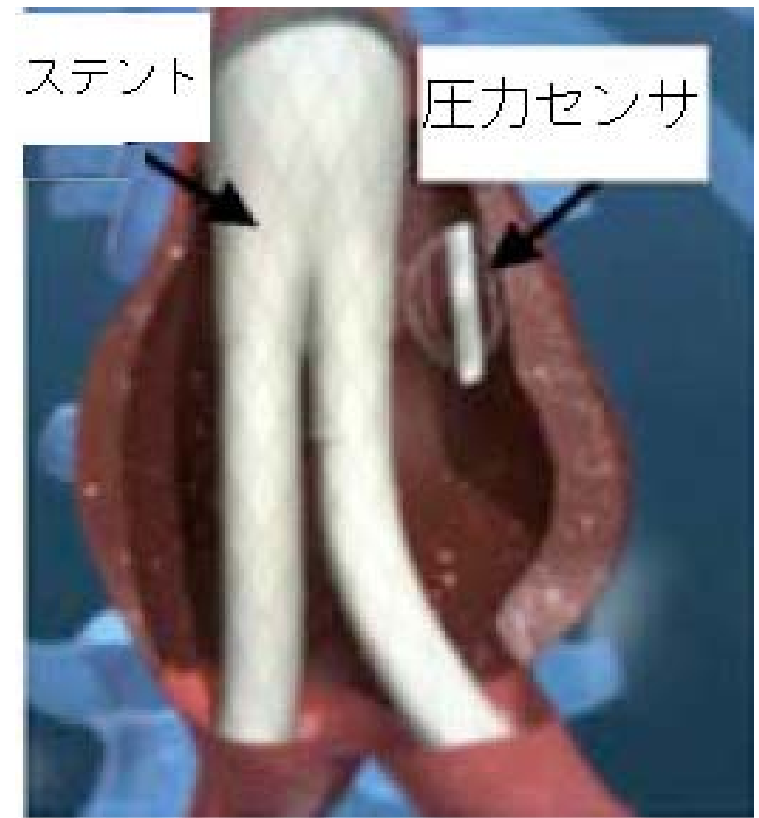
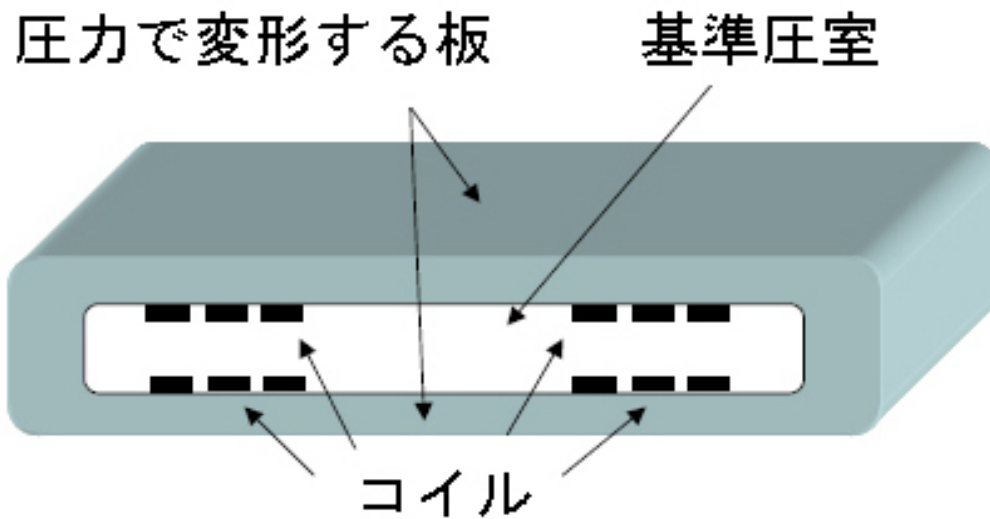
20min

100 配向したPt層(ヒロック)が形成される



100配向したPZT膜

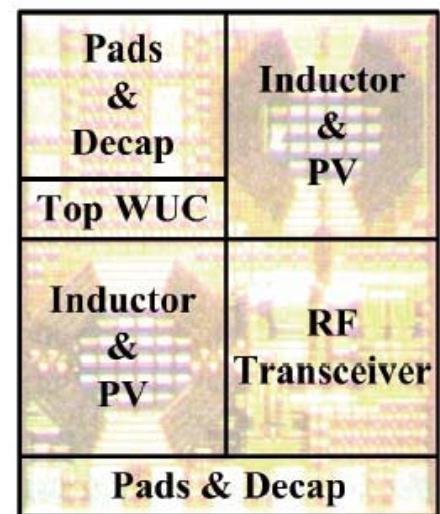
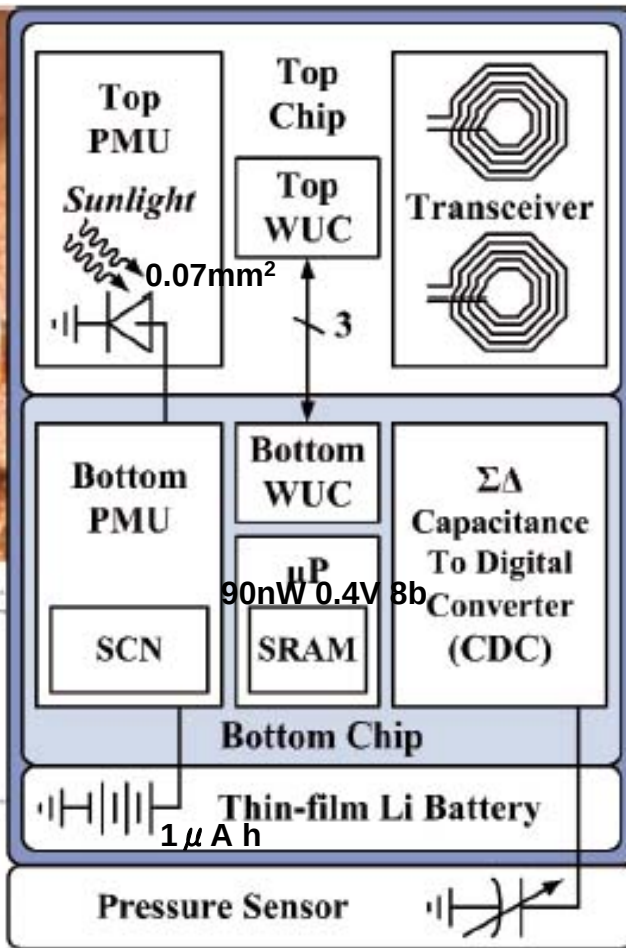
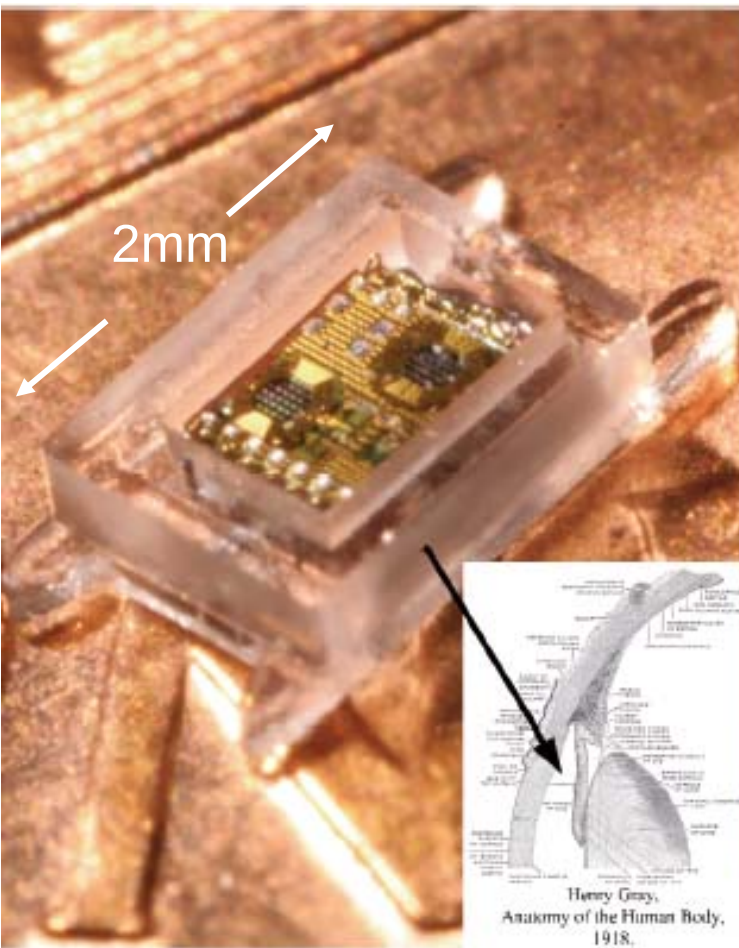
(H.Matsuo, Jap. J. Appl. Phys, 49 (2010) 061503)



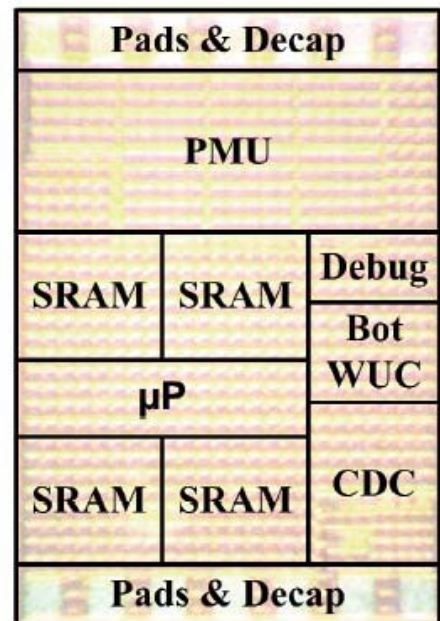
圧力によるLC共振回路の共振周波数変化を20cm以内の距離からワイヤレスで検出。厚い構造であるが、上下のコイル間隔はマイクロンオーダーと狭くしてあるため、外側が生体組織で覆われても感度変化は生じにくい。

体内埋込圧力センサ (CardioMEMS社 EndoSensor)

(M.G.Allen (Georgia Tech.) , Transducers' 05 (2005) 275)



Top Chip 0.18μm CMOS



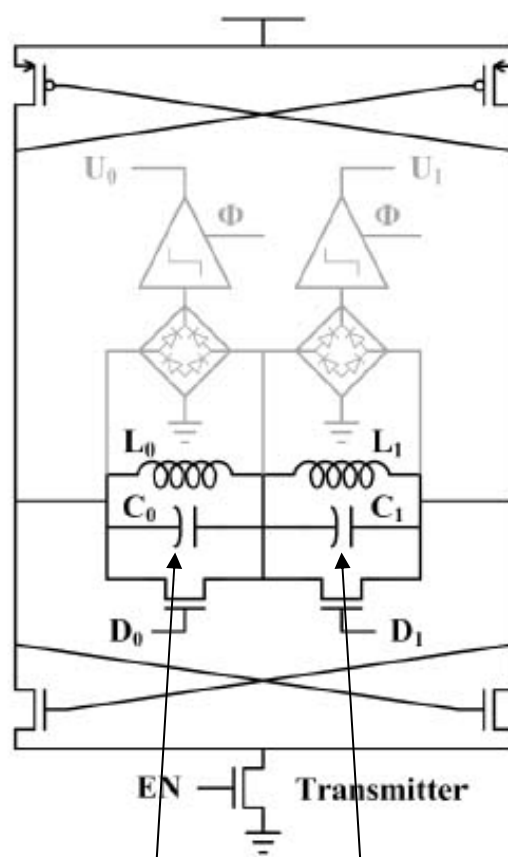
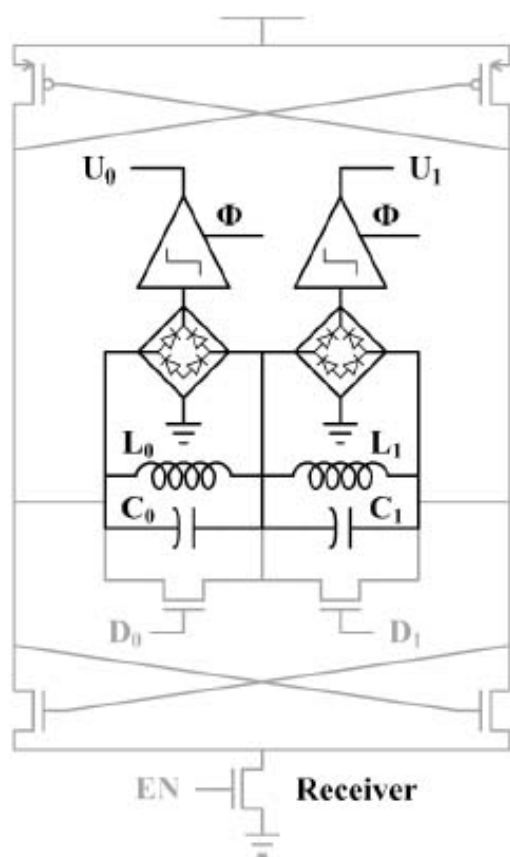
Bottom Chip 0.18μm CMOS

圧力データは3日、圧縮データは1週間保存して、まとめて送信
 μP : 90nW 0.4V 8b、SRAM : 4kb

緑内障に関係する眼内圧モニター

(G.Chen et.al.(Univ. of Michigan), ISSCC 2011, p.310)

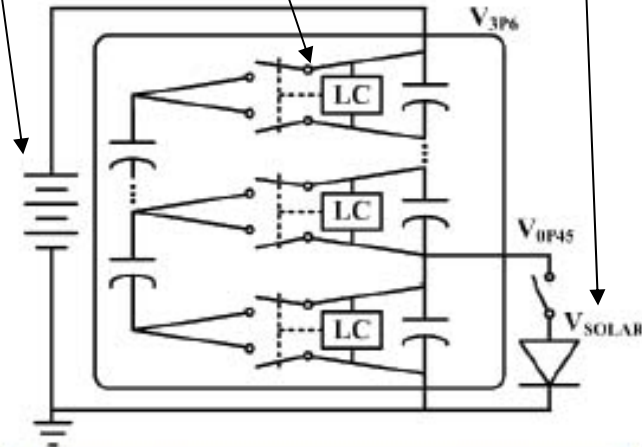
← 1mm → 41



1 μ A hの薄膜Li電池

0.07mm²の太陽電池

Level Converter



Active Mode	Power	Energy/Day
CDC	7.0 μ W	134.8 μ J
Transceiver	47.0 mW	6.3 μ J
PMU	116.9 nW	2.2 μ J
• μ P @ 100 kHz	90.0 nW	1.7 μ J
Standby Mode	Power	Energy/Day
CDC	172.8 pW	14.9 μ J
Transceiver	3.3 nW	285.1 μ J
PMU	174.8 pW	15.1 μ J
• 4kb SRAM	9.8 pW	846.7 nJ
• WUC	62.0 pW	5.2 μ J

IOPM power consumption is 5.3nW
0.07mm² solar cell supplies 80.6nW

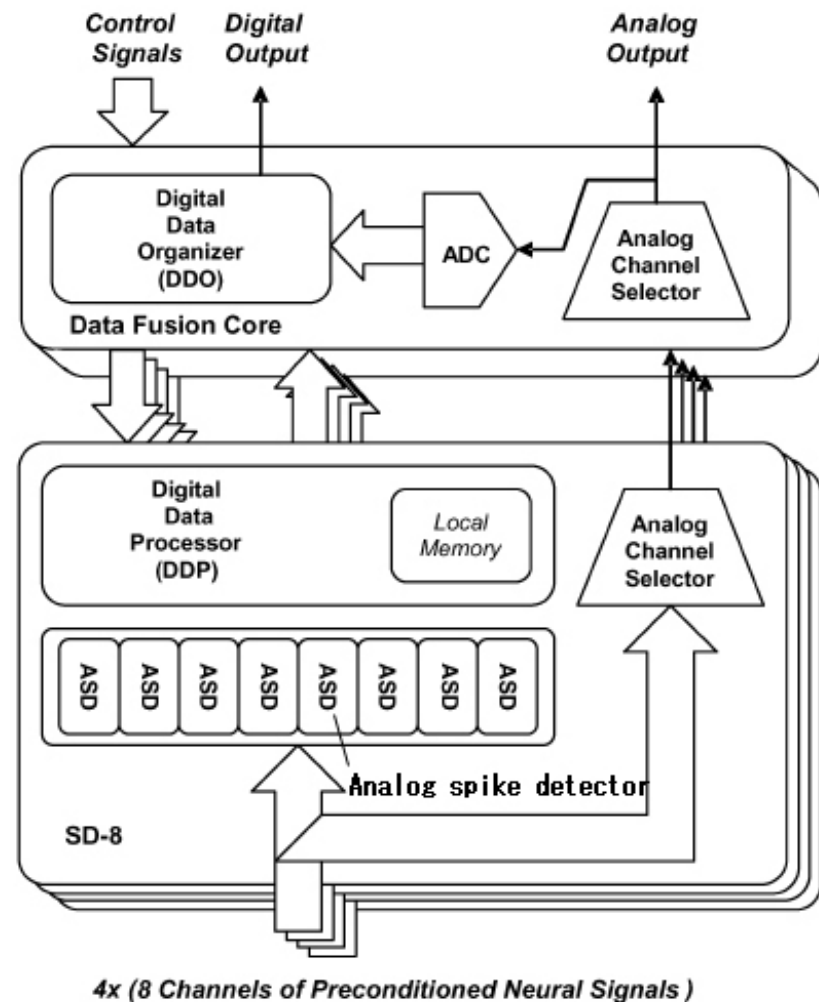
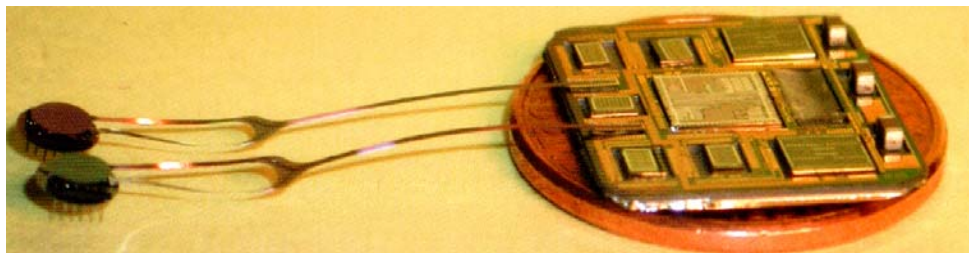
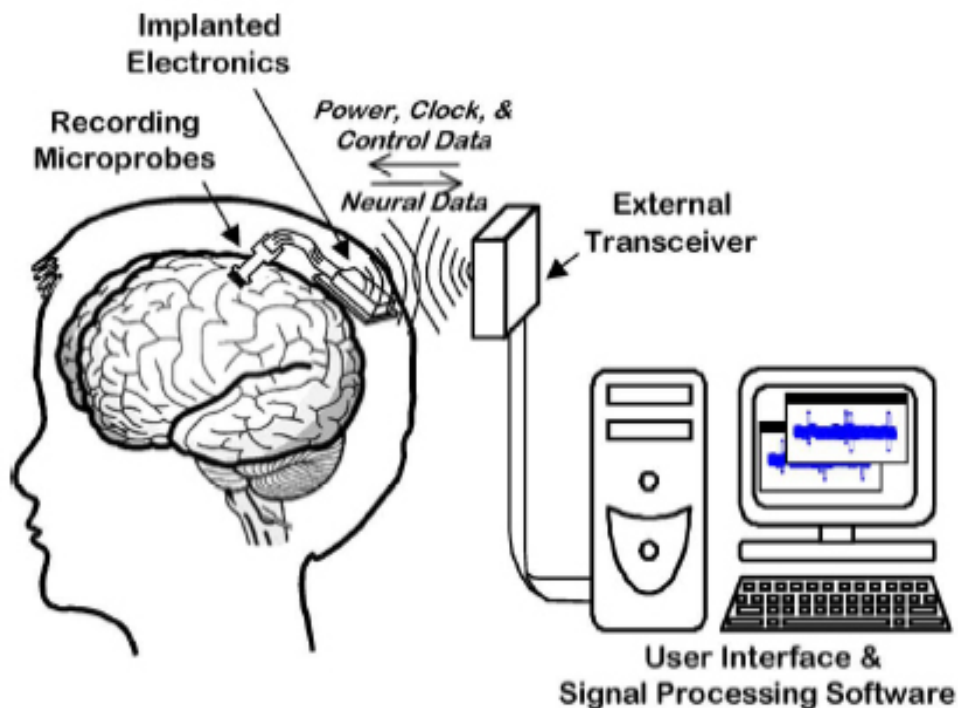
Figure 17.6.4: The series-connected LC tanks: (1) enable greater frequency separation than a single tank transmitter, relaxing phase noise requirements, and (2) reduce area compared to two separate LC tanks.

570MHz 690MHz

のFSK
(Frequency Shift Keying)

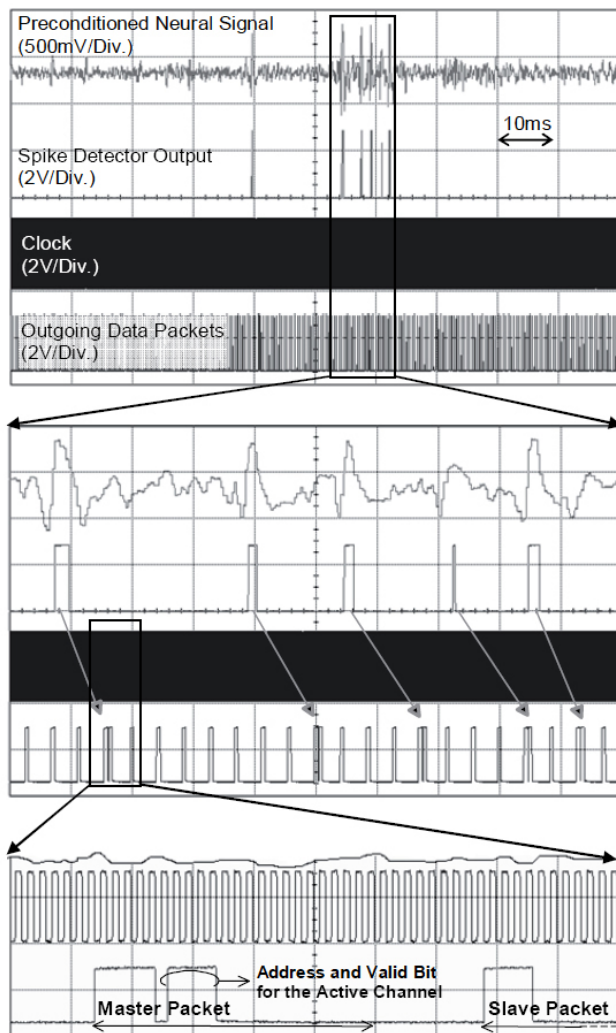
U_0, U_1 : Digital Wakeup 信号

眼内圧モニターの信号読出(左)とエネルギー源(右)

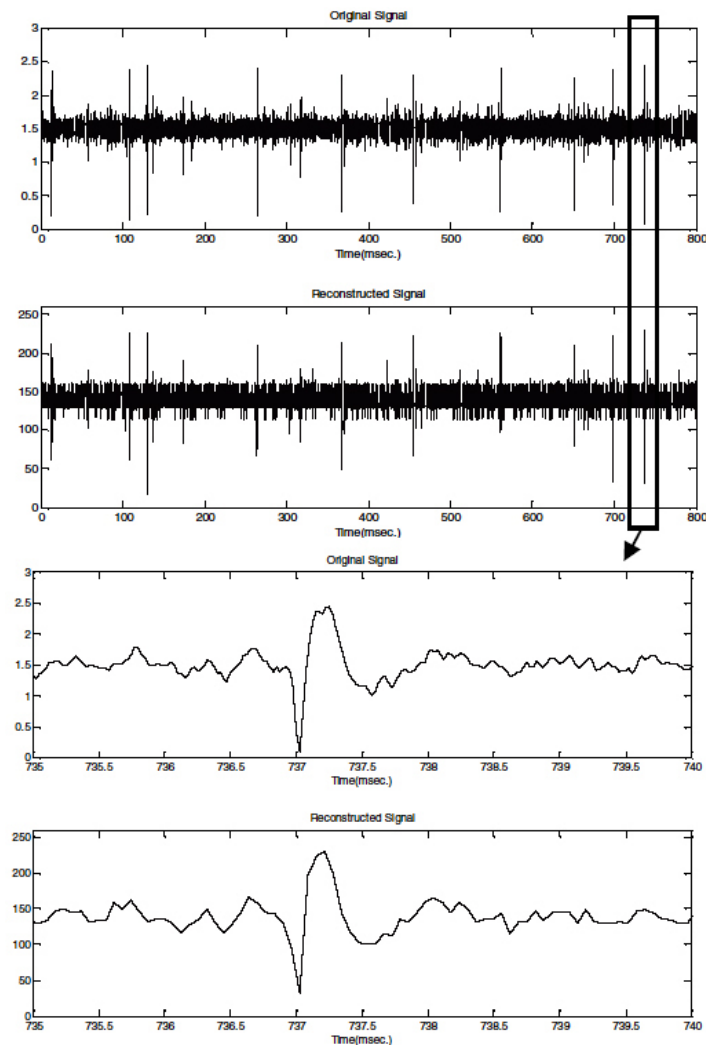


ワイヤレス多チャンネル神経インパルス検出システム (ミシガン大学)

(A.M.Sodagar, K.D.Wise and K.Najafi, A fully integrated mixed-signal processor for implantable multichannel cortical recoding, IEEE Trans. on Biomedical Eng., 54 (2007) 1075-1088)



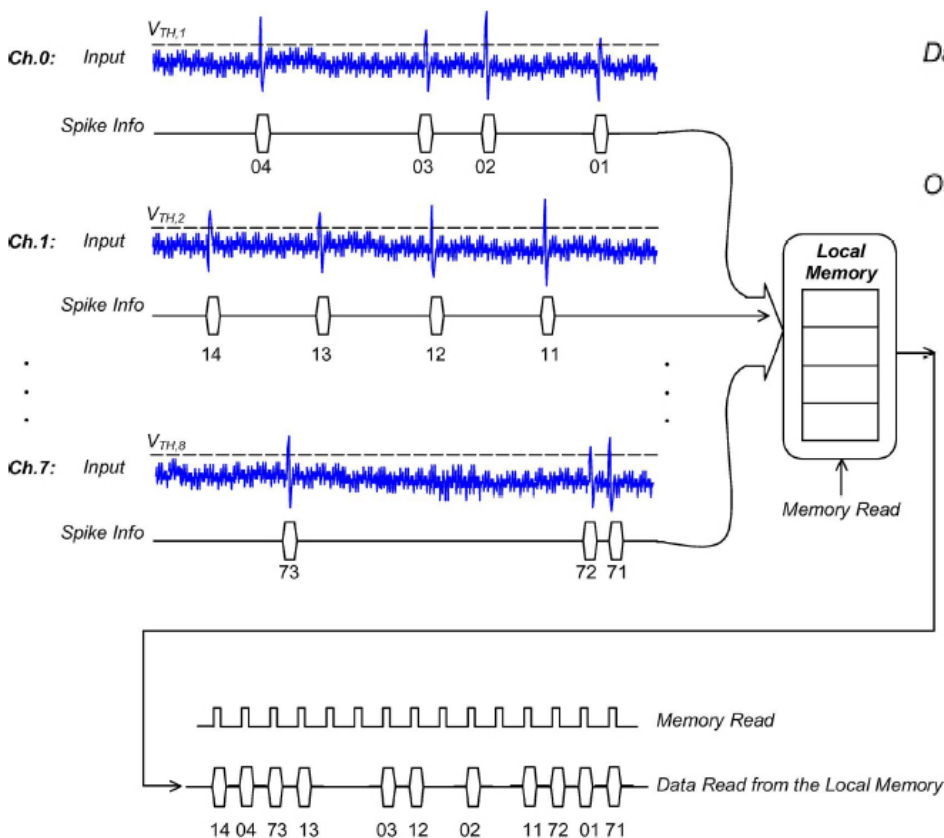
スキャンモード



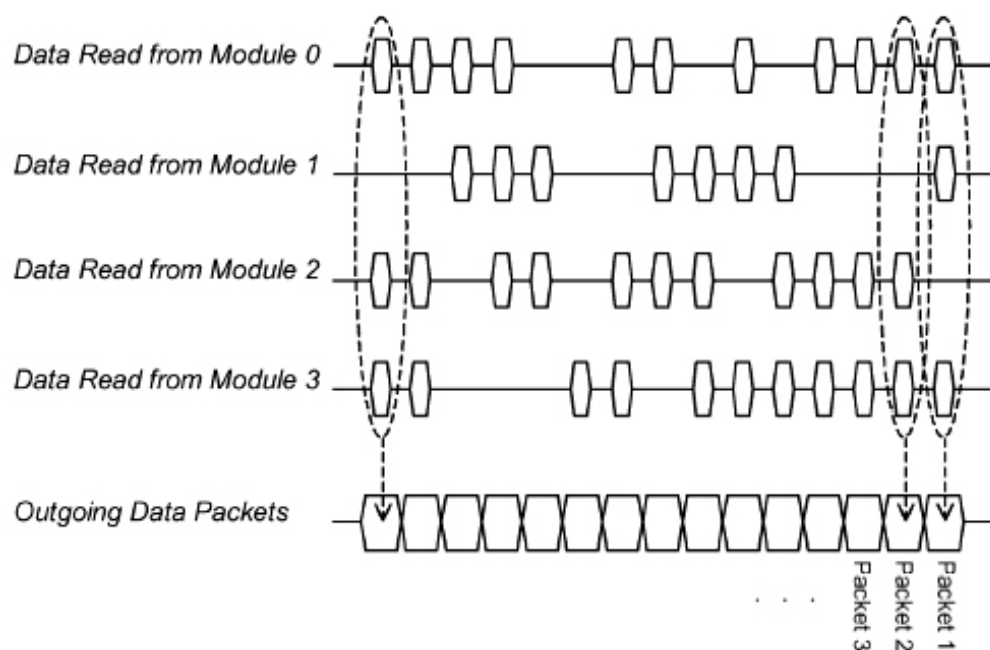
モニタモード

ワイヤレス多チャンネル神経インパルス検出システムの出力

(A.M.Sodagar, G.E.Perlin, Y.Yao, K.D.Wise and K.Najafi, An implantable microsystems for wireless multi-channel cortical recording, Transducers'07 (2007) 69-72)

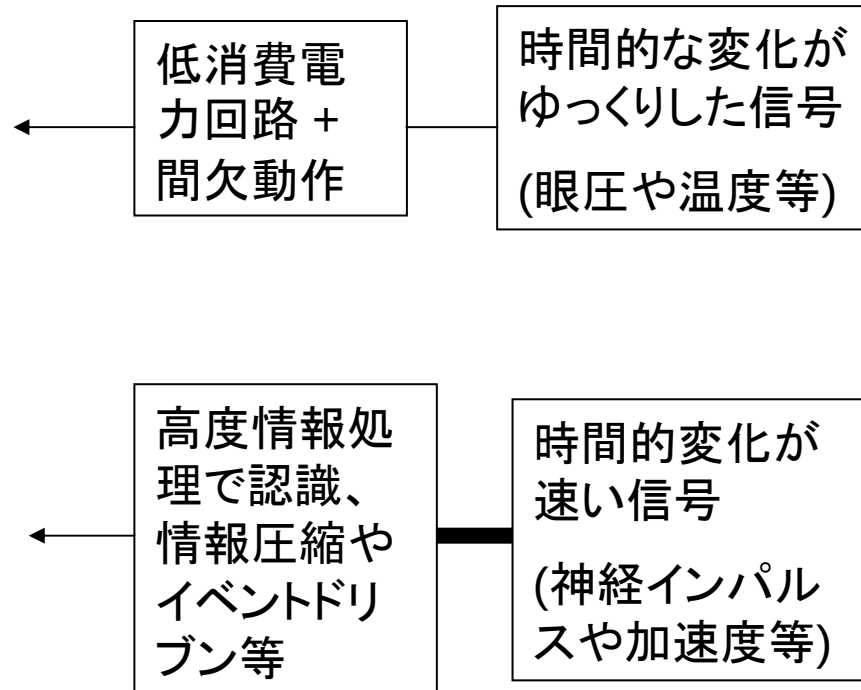


8チャンネルモジュール (SD8)での処理



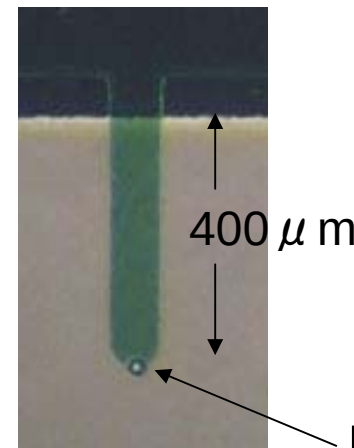
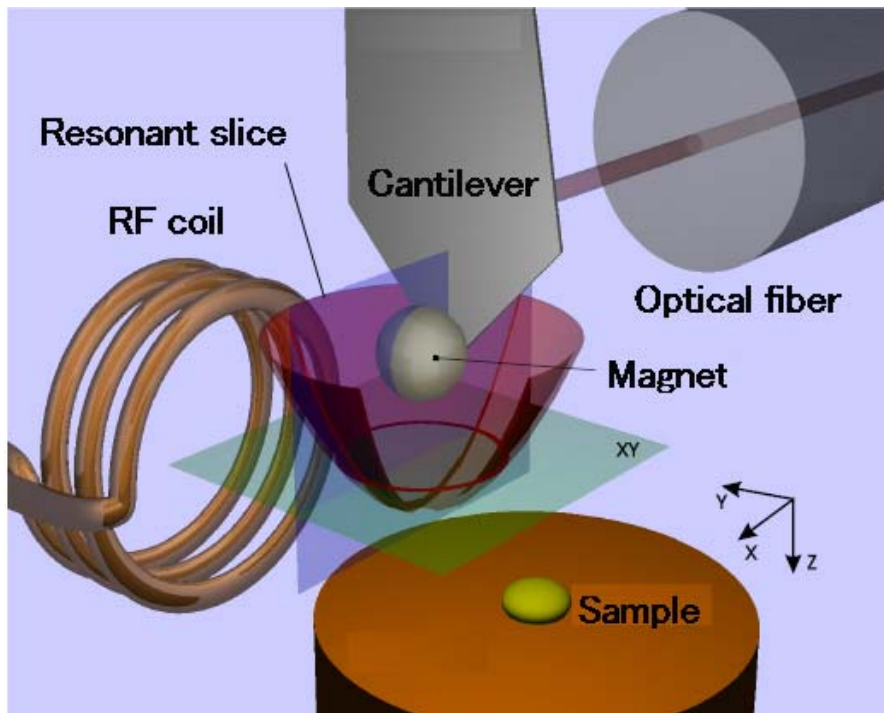
4モジュールから出力データ packets を作るデジタル出力モジュール (Data fusion core)

ワイヤレス多チャンネル神経
インパルス検出システム用64
チャンネル信号処理



ワイヤレスセンサの低電力化

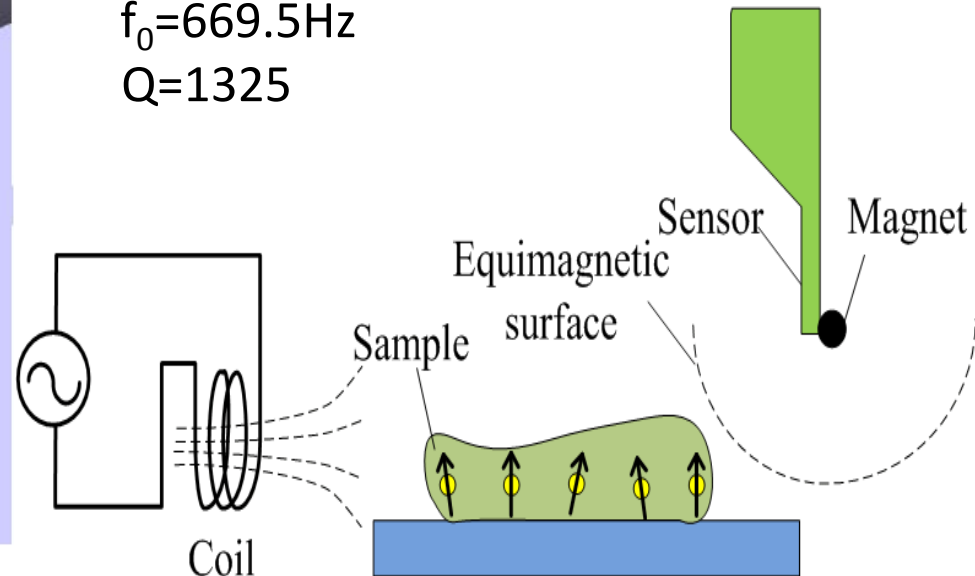
- 生物細胞などの立体イメージングにより、薬物の効果などを無侵襲で評価
- マイクロ/ナノ構造の片持梁を用いるため高感度に磁気力検出 $\sim 10^{-18}$ g



振動子の共振周波数変化から微小磁気力検出

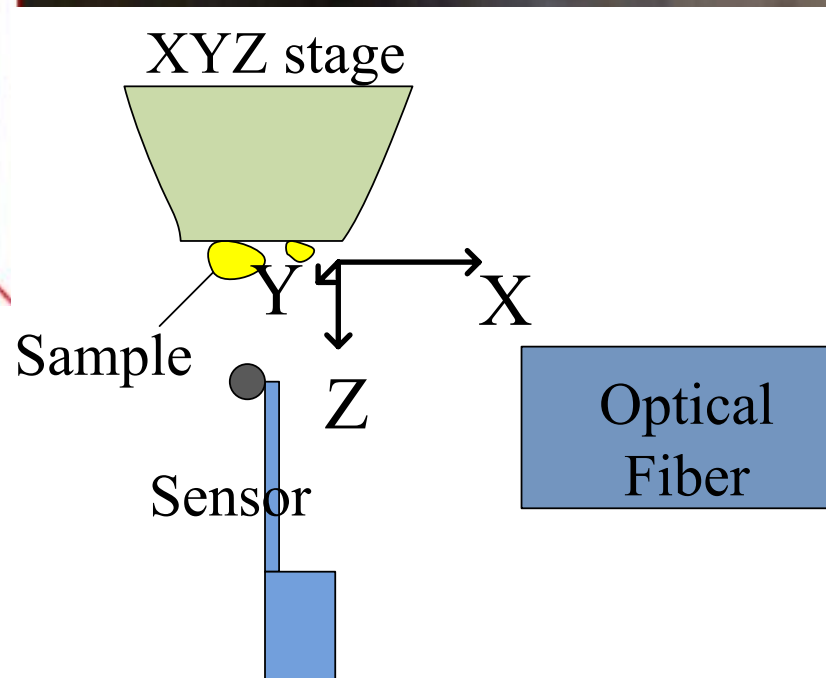
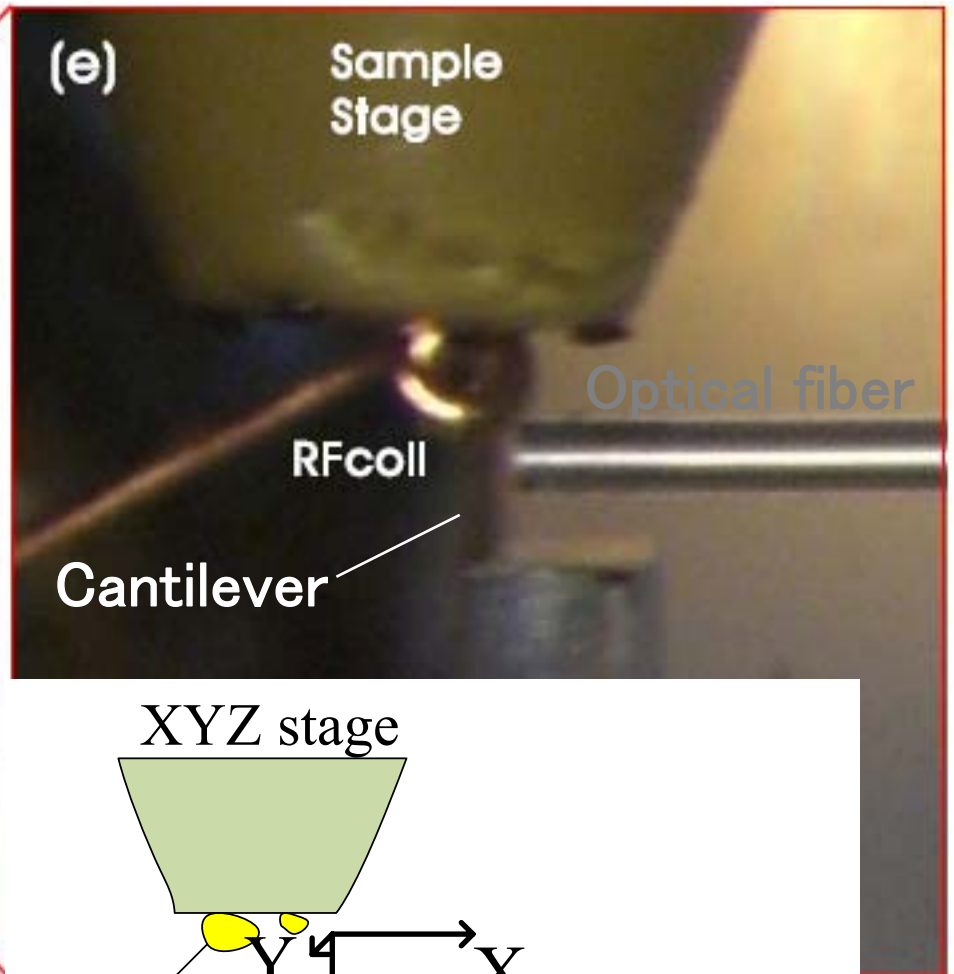
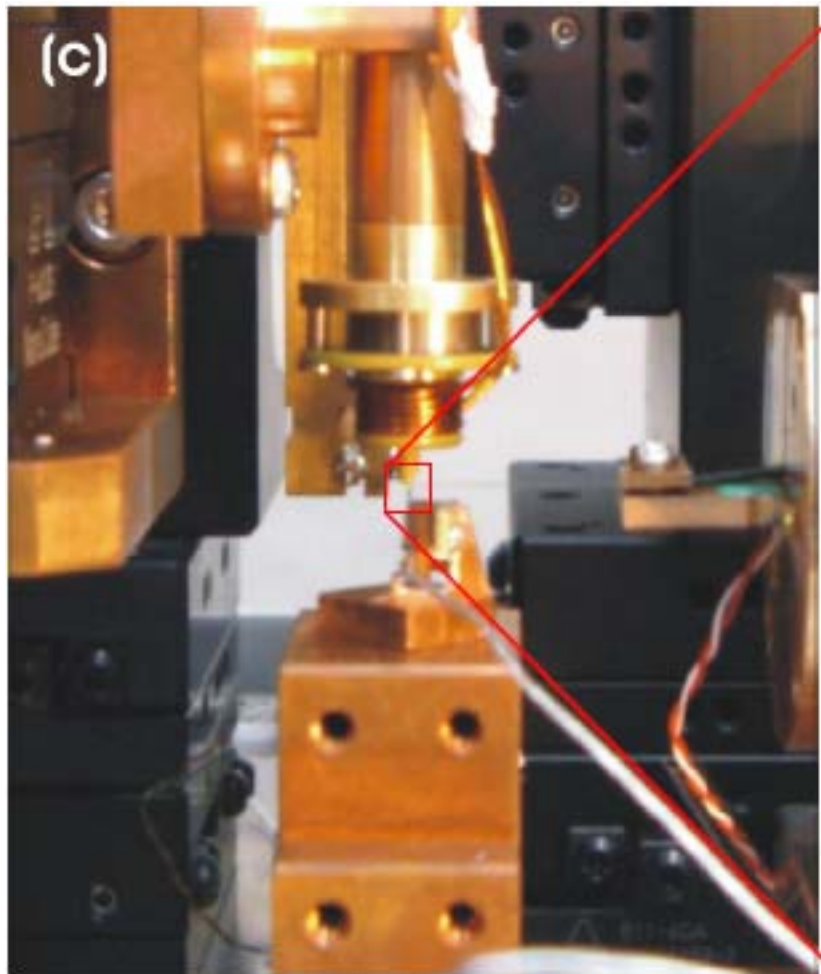
NdFeB 磁石 (10 μ m 径)

0.2 μ m 厚
 $f_0 = 669.5$ Hz
 $Q = 1325$

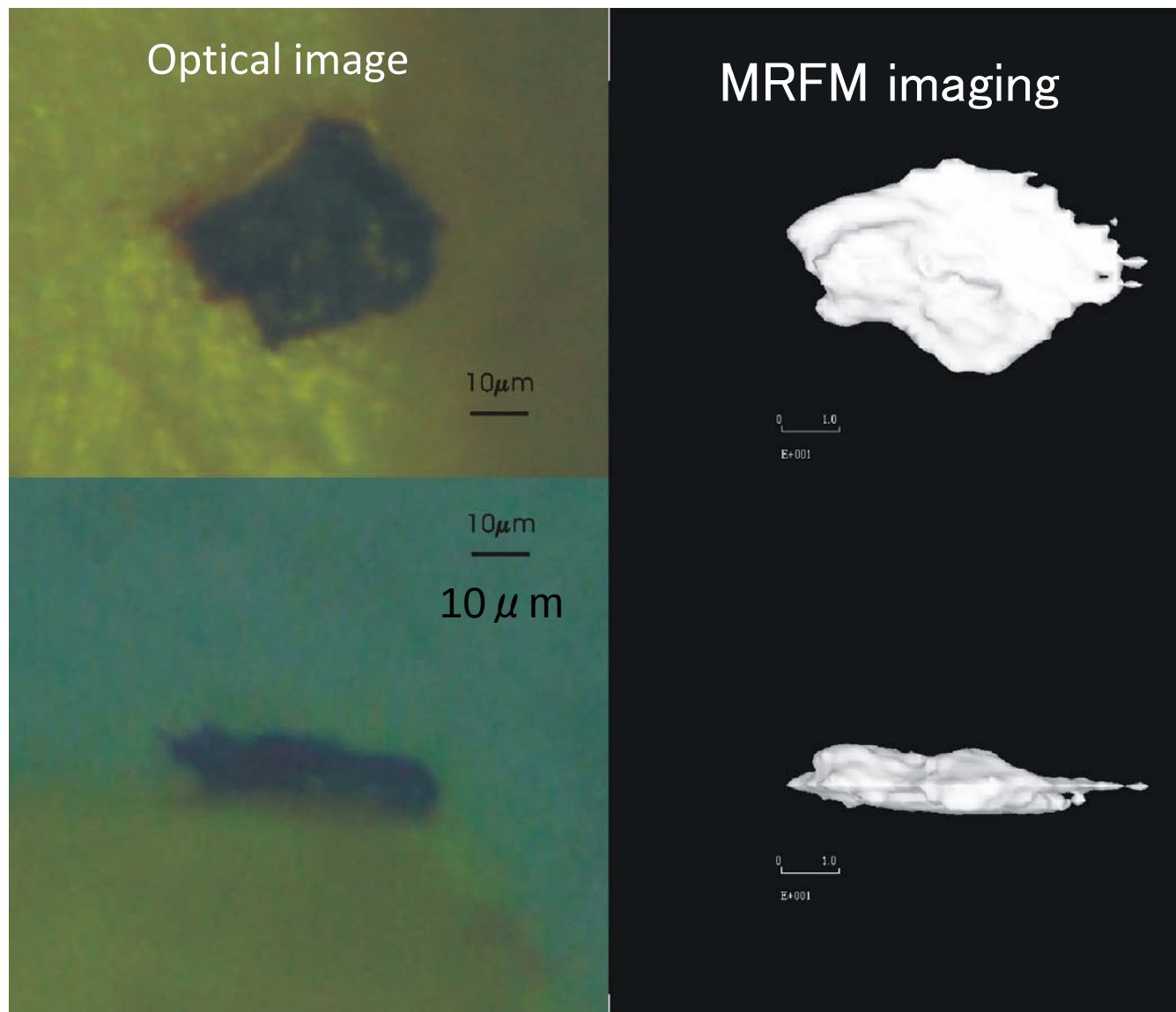


磁気共鳴力顕微鏡 (Magnetic Resonance Force detective Microscope (MRFM))用振動式磁気センサ

(T.Ono and M.Esashi, Rev. of Scientific Instruments, 74 (2003) 5141)



MRFMを用いた イメージング実験



磁気共鳴力顕微鏡(MRFM)による電子スピン共鳴(ESR)イメージング
(試料 DPPH (diphenylpicrylhydrazil))(日本電子(株) 吉成洋祐氏提供)

MEMS技術の真価

システムLSIの差異化技術へ 3次元構造や異種材料を導入

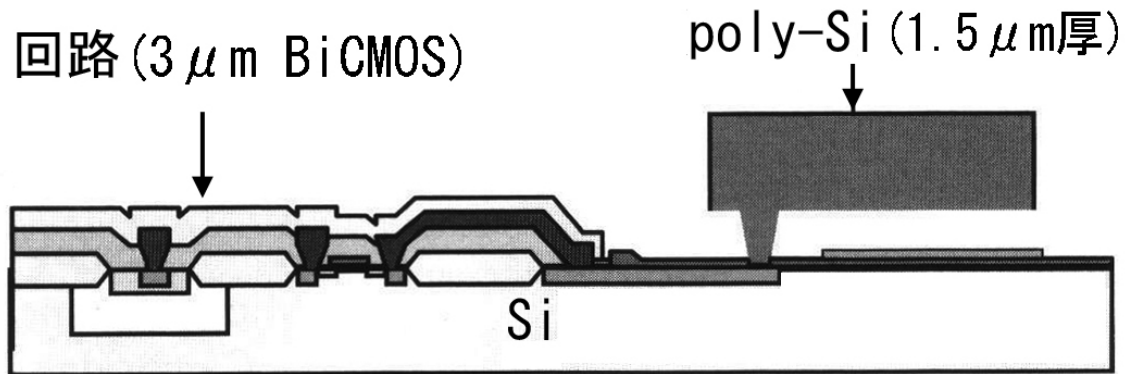
センサーやアクチュエータなどの個別部品をSi基板上に集積化できる

MEMS (micro electro mechanical systems) 技術。

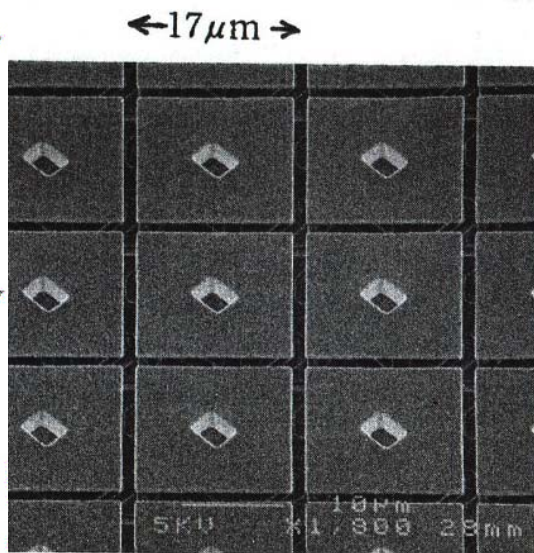
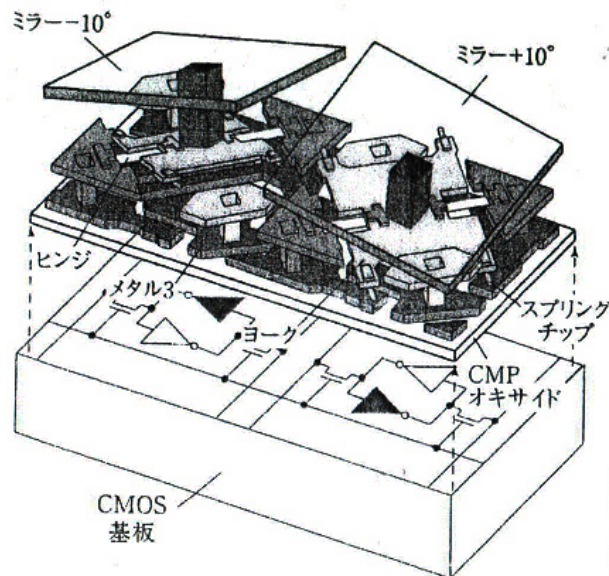
これまでは半導体とは遠い存在というイメージが強かったが、
ここへ来てシステムLSIの差異化技術として注目を集めている。

すでに、欧米ではシステムLSI向けの研究・開発が進んでおり、
台湾では待ち望まれていたMEMSファウンドリが立ち上がった。

この分野で世界をリードする東北大学教授の江刺正喜氏が
急速に発展するMEMS技術の全容を解説する。(木村 雅秀＝本誌)



加速度センサ(アナログデバイス)

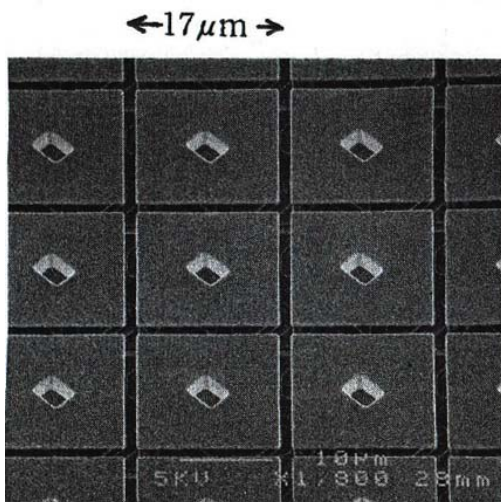


ビデオプロジェクタ用DMD(テキサスインスツルメンツ)

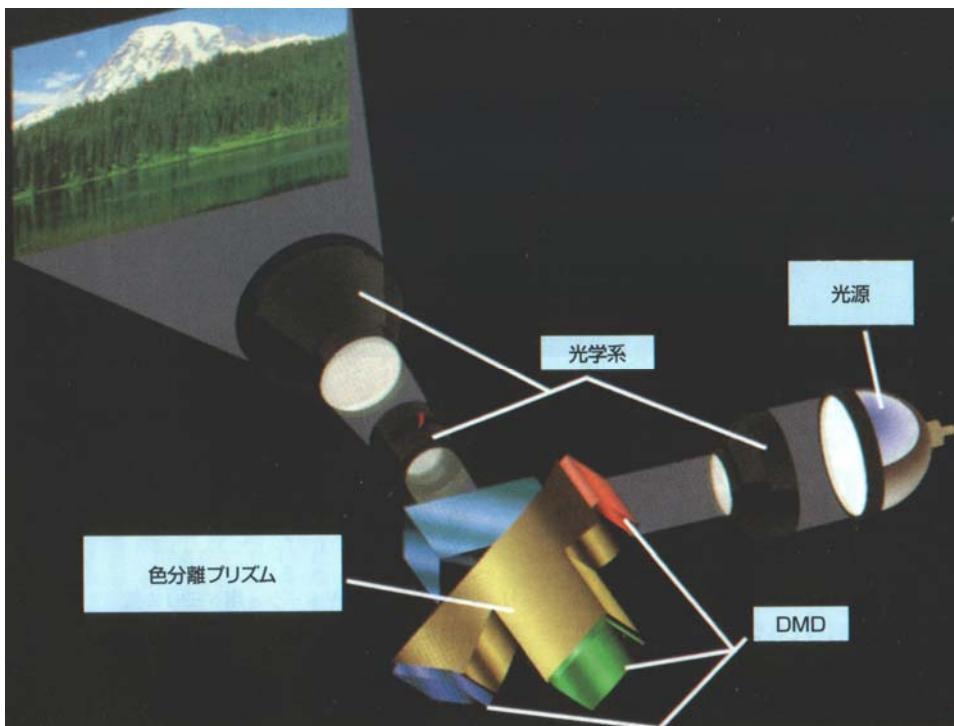
現在の集積化MEMS

ばねとして優れた構造のMEMSにするため、ポリシリコンの応力制御に1100°C、3hの熱処理が必要。このため、**微細回路の上には形成できない。**

Al合金製のMEMSなため、低温で微細回路上にでも形成できる。しかし**MEMSはバネとしての性能が良くない。**



デジタル映写機
(1920 × 1080画素)



1999年 Star Wars : Episode 1
(George Lucas監督) がDLPによる
デジタルシネマでニューヨークとロサ
ンゼルスで初上映

ビデオプロジェクタ用DMD (Digital Micromirror Device)(米TI社) ⁵²

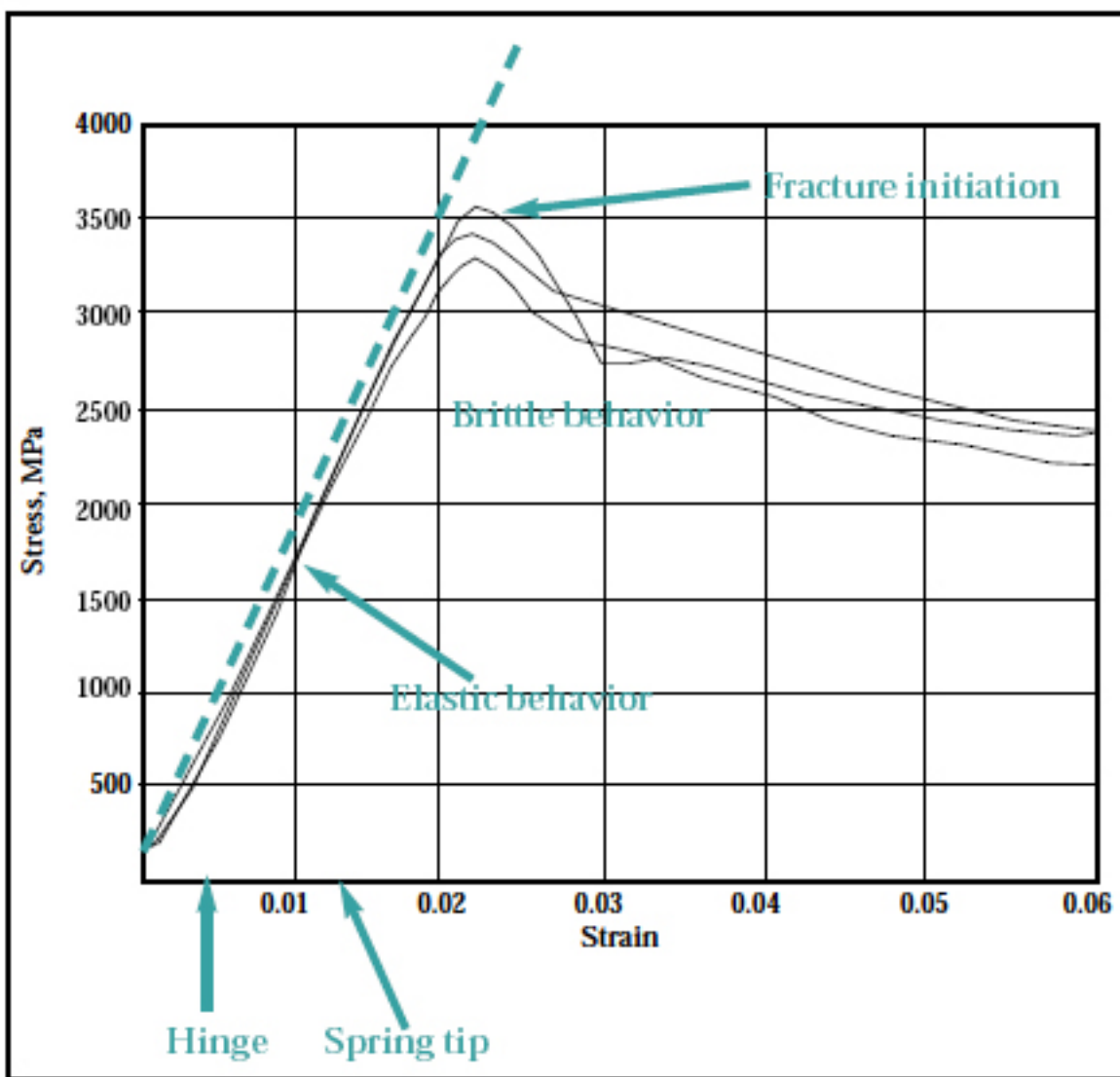
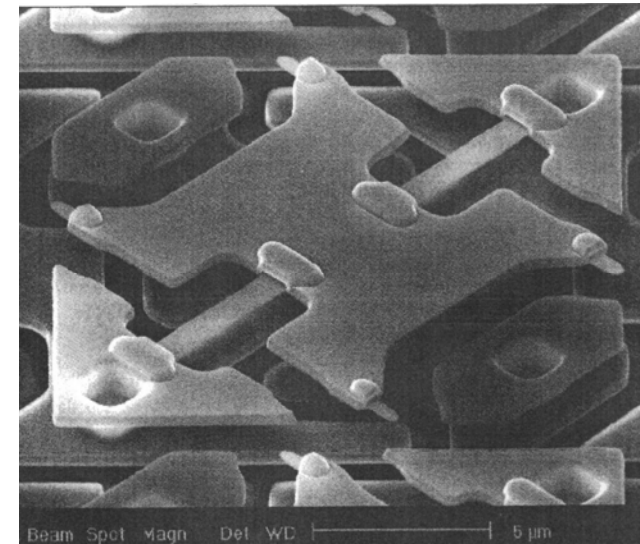


Fig. 4 — Stress vs. strain in an amorphous TiAl_3 film deposited by an MRC machine onto a polyimide substrate. The film is 50 nm thick. The curves show a large elastic range until microfracturing commences.

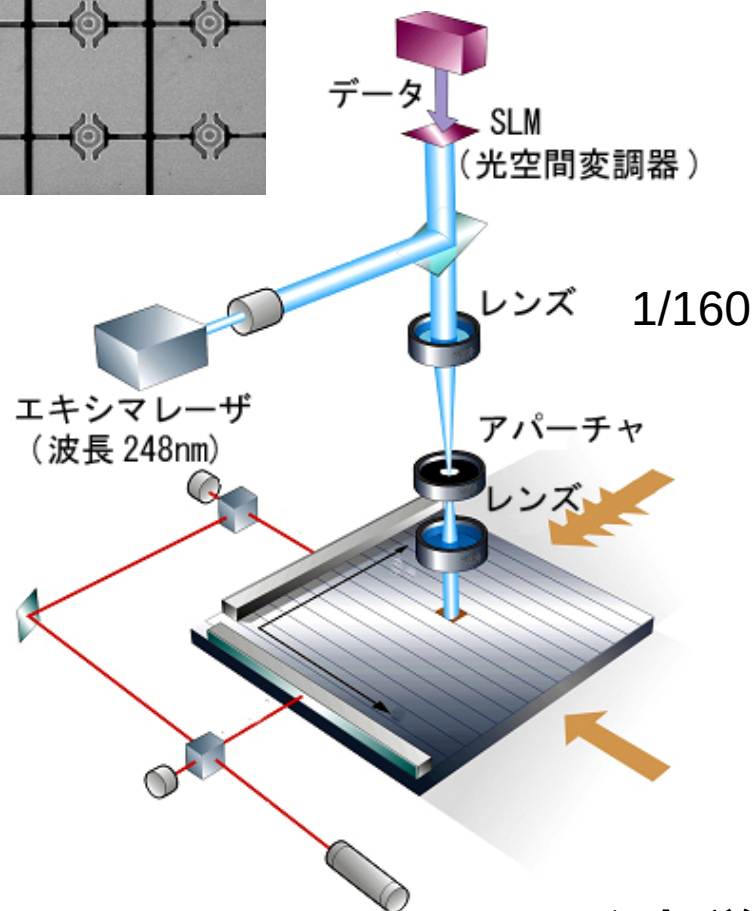
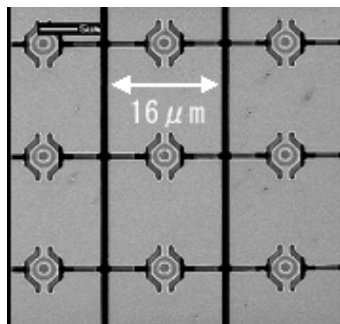


TiAl_3 を用いたDMDの構造

振動子の疲労による破壊はアモルファス TiAl_3 を用いることで解決。材料のクリープによる応答の悪さのため、時分割(DLP)で諧調表現。

DMDに用いられている TiAl_3 の歪-応力 曲線

(J.Tregilgas, Advanced materials and Processes, (2005 Jan.) 45-49)

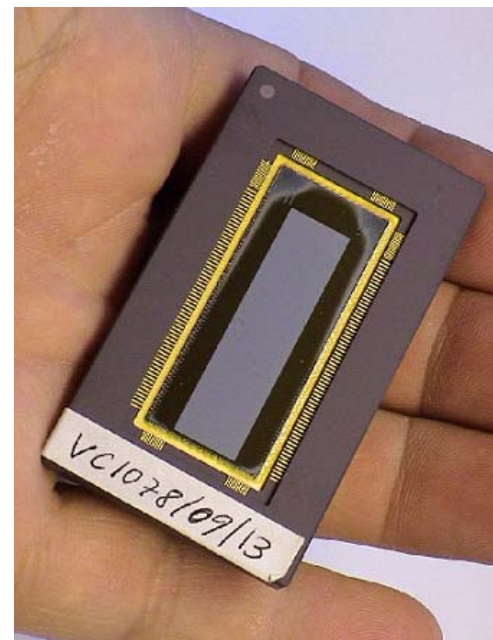


MEMSミラーアレイによる光学式 マスク描画装置

Optical Maskless Lithography –OML

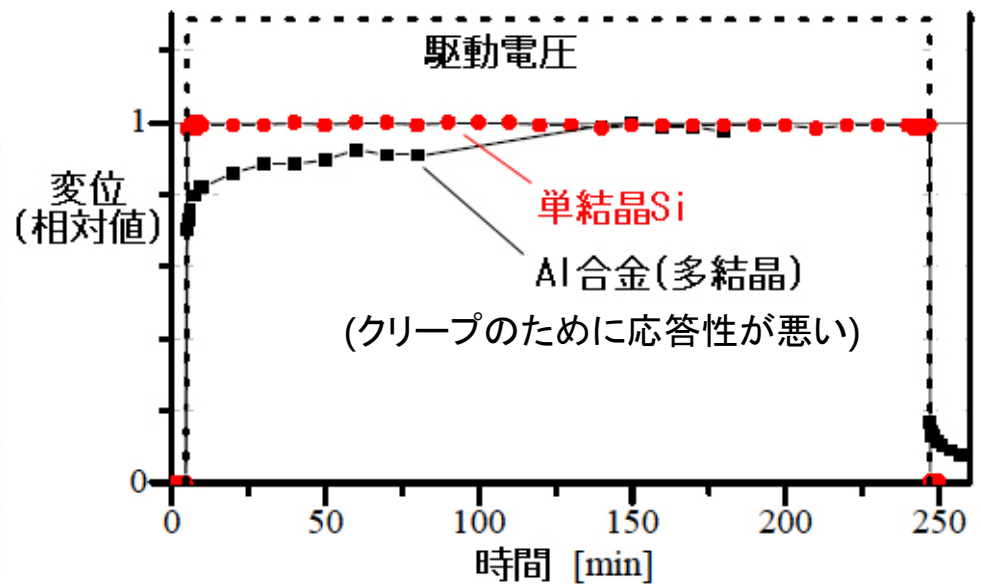
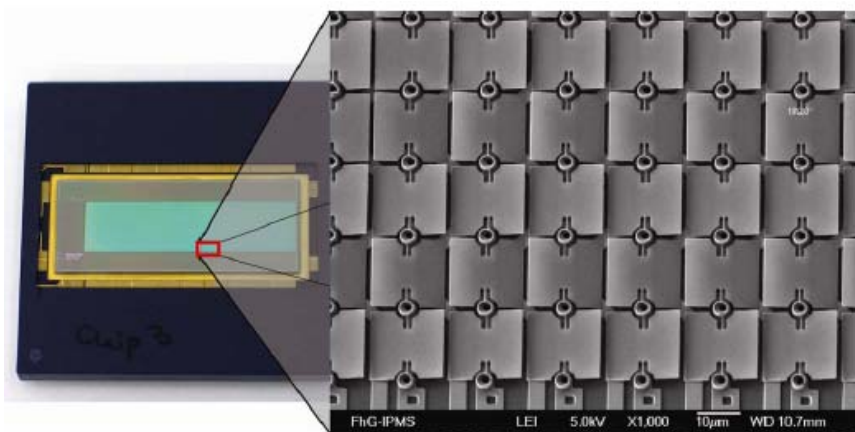
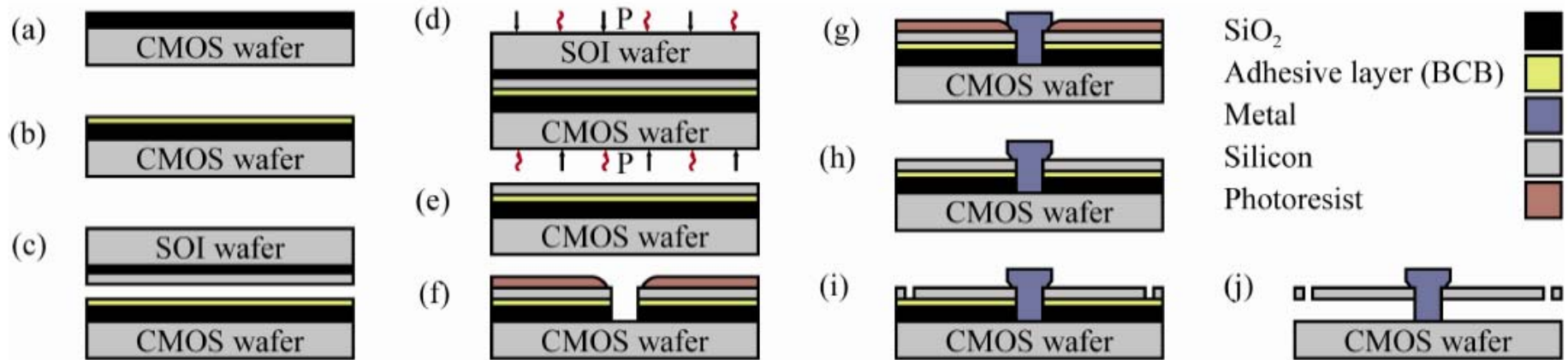
(Micronic Laser Systems,)

(J.Aman, SPIE 5256 (2003) 684-694)



Micronic Sigma7300

200nm以下の線幅で256×256のパター
ンを毎秒千フラッシュで高速に描画



(F.Zimmer (Fraunhofer IPMS), G.Stemma (KTH) et.al., MEMS 2011 (2011) 736)

CMOS回路上の単結晶Siマイクロミラー

Si技術を使ったMEMS発振器 水晶発振器の置き換えを狙う

江刺 正喜

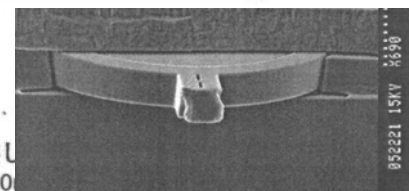
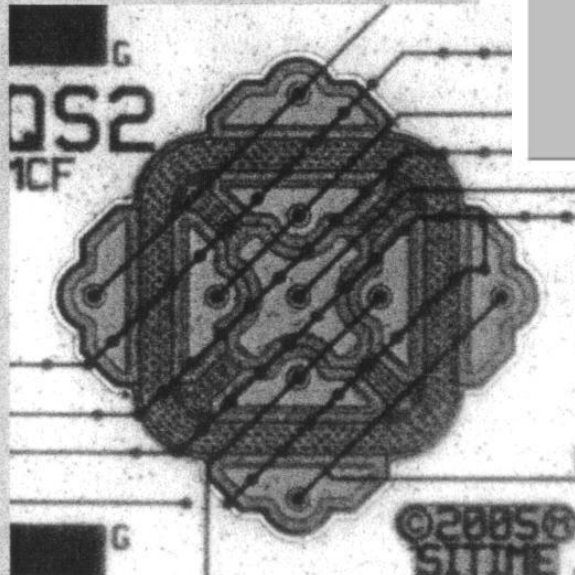
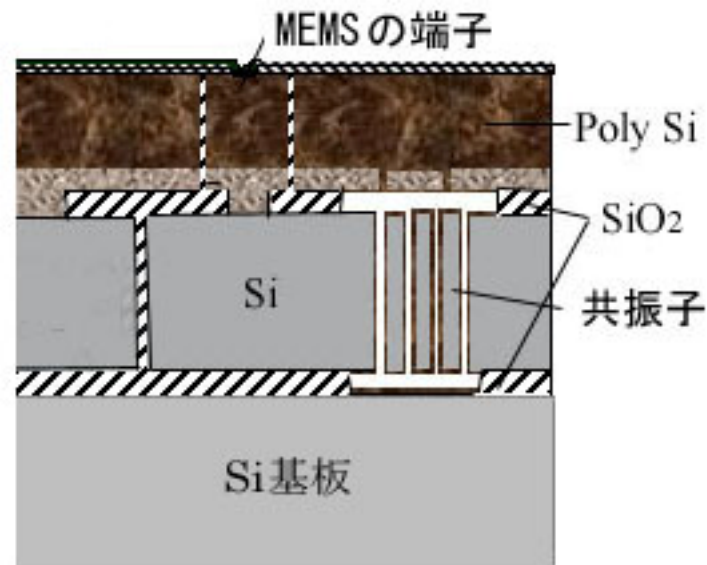
東北大学 大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 教授
米SiTime Corp. 技術顧問

John McDonald

米SiTime Corp., Vice President

Aaron Partridge

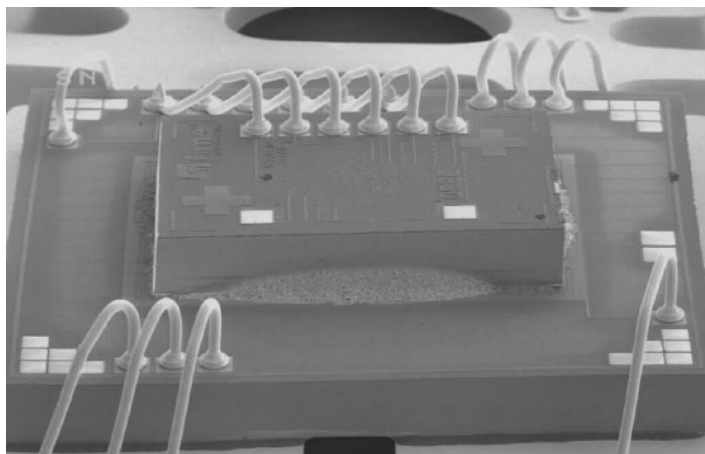
米SiTime Corp., Chief Technical Officer



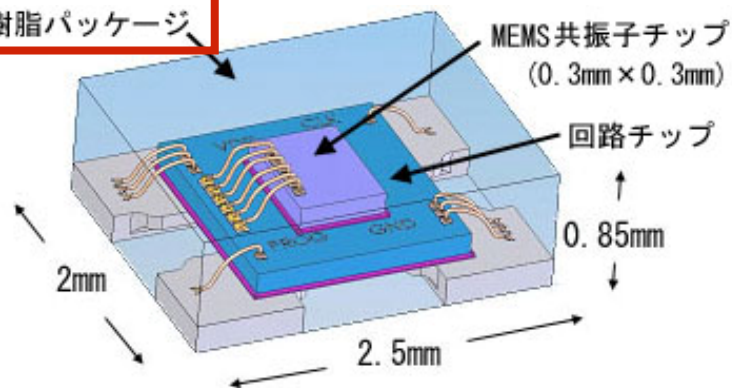
SOI基板上に作製した共振器「MEMS-first」の表面を、赤外線撮影した写真。赤外線はSiを透過するため、基板内部に埋め込まれた共振器を観察できる。この共振器は「SiT8002」および「SiT11xx」シリーズに使うもの。これらの製品において、共振器はCMOS技術で作製した駆動回路とともに、マルチチップ・モジュールという形で1パッケージに収めている。

振動モード

日経エレクトロニクス,
No.923, 2006年4月10日



樹脂パッケージ

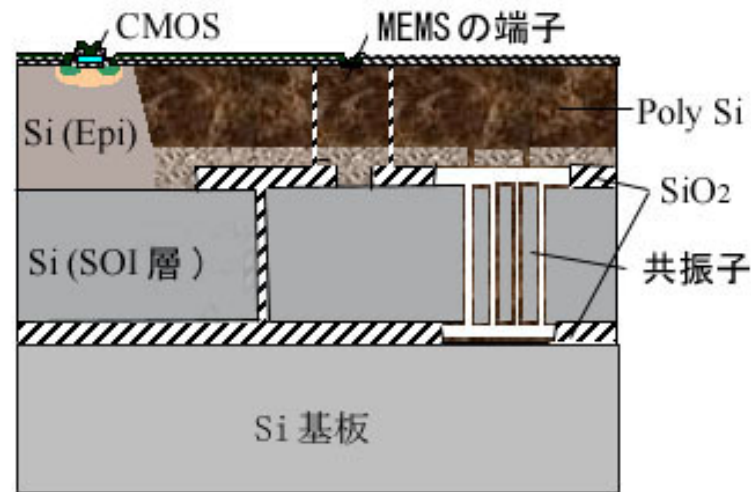
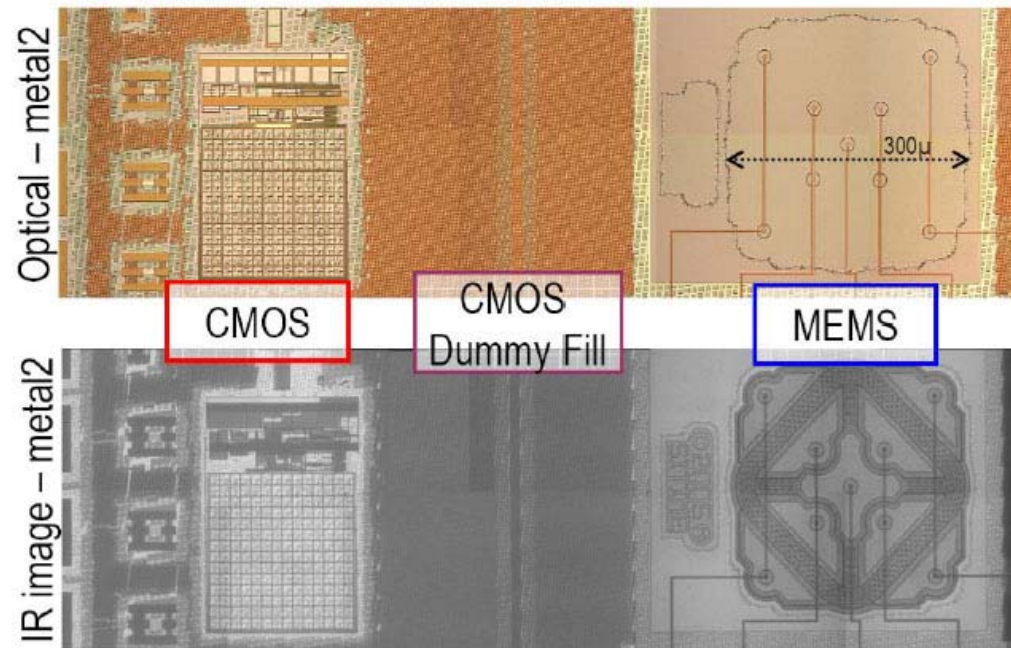


回路チップ (温度補償発振回路+プログラマブルPLL)上に共振子チップ (0.3mm角)を重ねた基準信号発生器

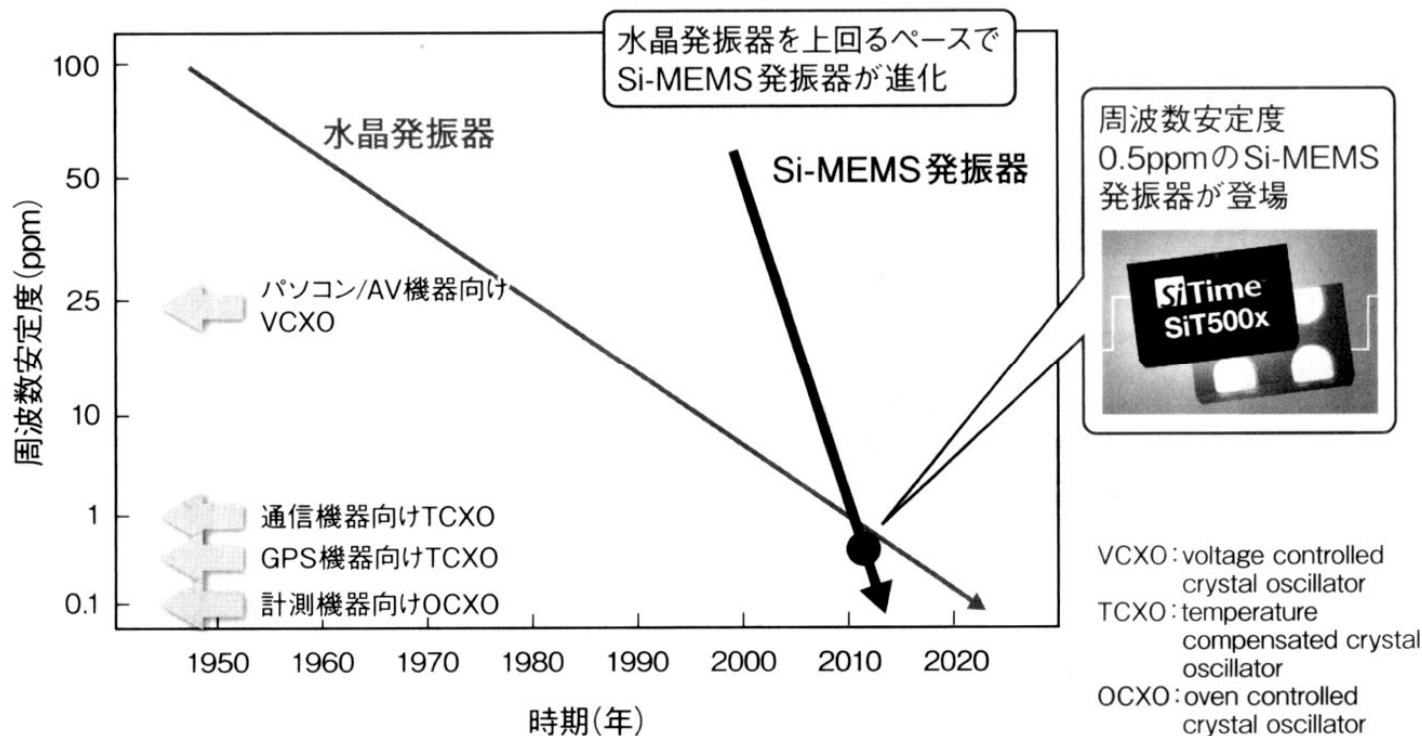
量産性：5万個/8インチウェハ

耐衝撃性: 6軸 3万G

極薄(厚さ0.38mm) → カードなど



今後：MEMSと回路のモノリシック化
→ さらなる低ジッターの高性能化



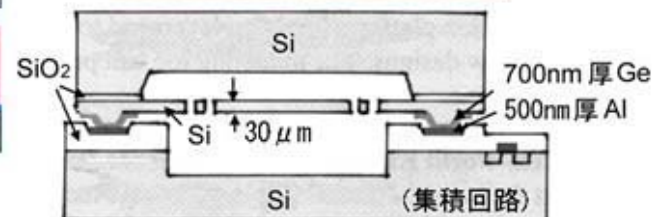
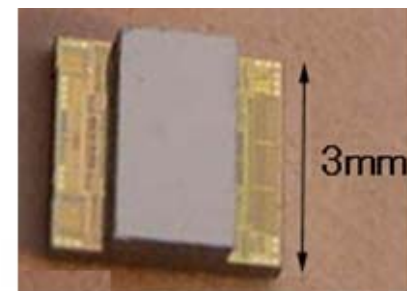
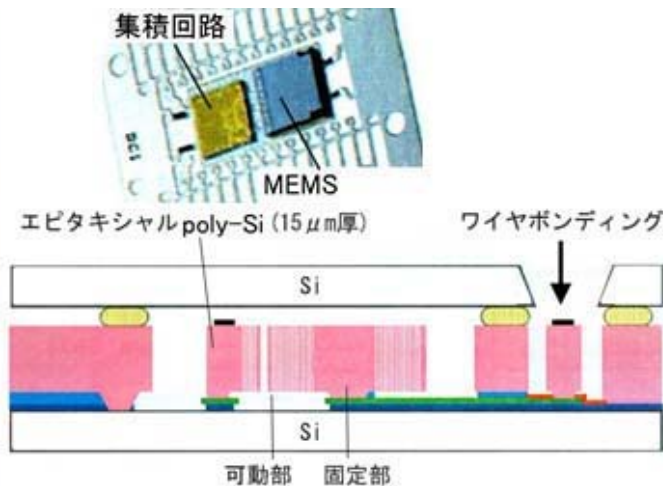
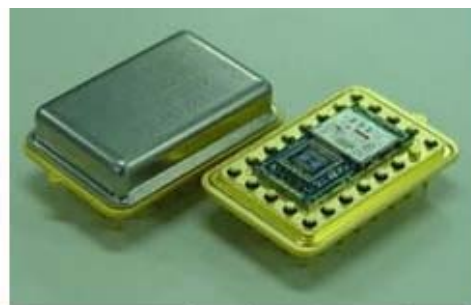
TCXO並みの周波数安定度を実現

Si-MEMS 発振器は、これまでパソコン/AV機器向けVCXO水準の周波数安定度しか実現できなかったが、ここへ来て通信機器/GPS機器向けTCXO水準の精度を持つ製品が登場した。図は、SiTime社の資料を基に本誌が作成。

2011年のクロック発振器市場 41億米ドル

そのうち11億米ドルがSiオシレータ

Si-MEMS発振器の高精度化

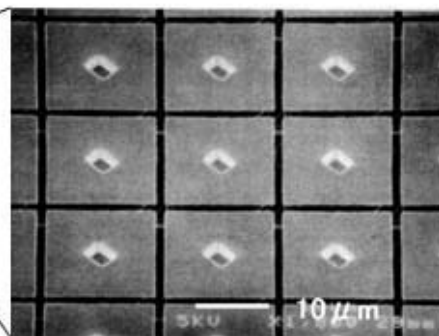


(STマイクロエレクトロニクス社(欧))

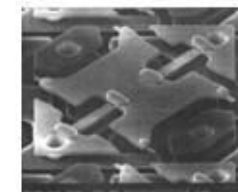
(インベンセンス社(米))

加速度センサ・ジャイロ

(MEMSチップ + 集積回路 チップ)



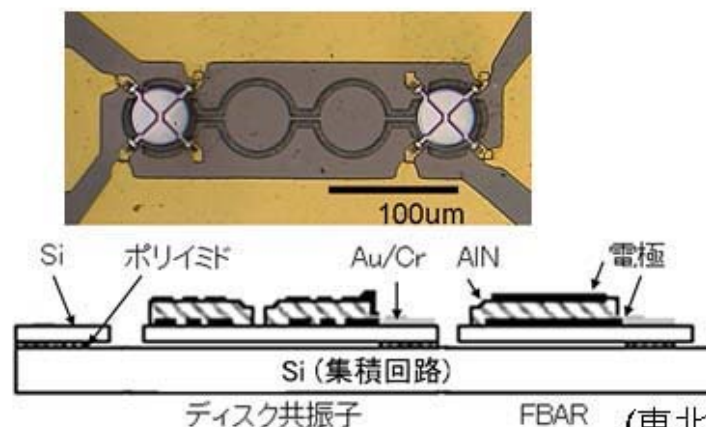
(テキサス・インスツルメンツ社(米))



ミラー下ヒンジ

表示用ミラーアレイ

(集積回路上でMEMS形成)

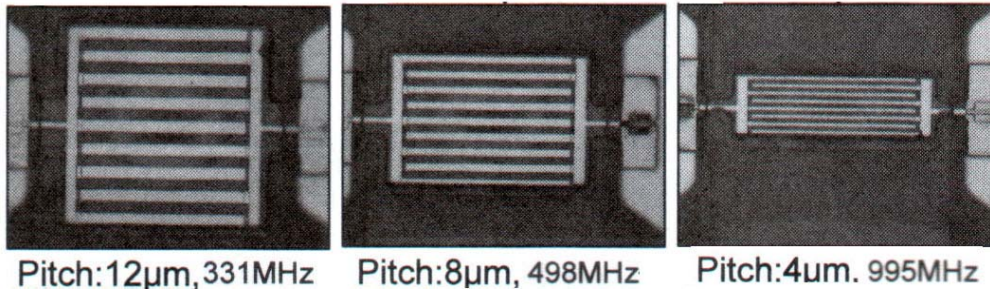
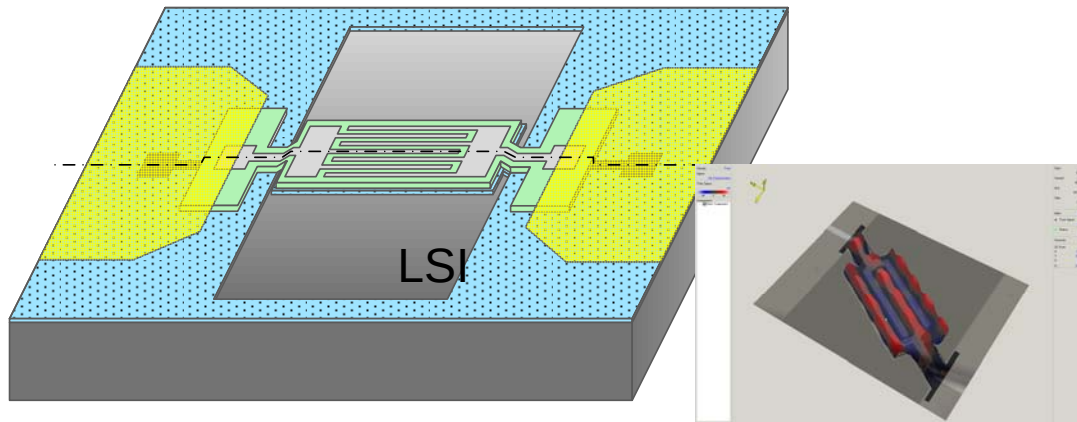


集積回路上の通信用フィルタ

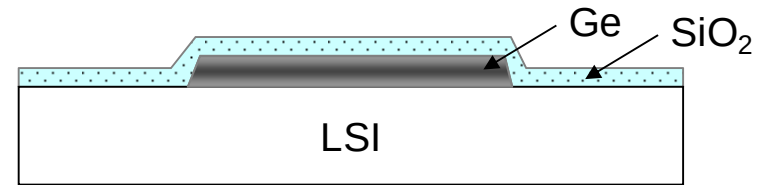
(樹脂接合で集積回路上にMEMSを形成)

■ LSI上にモノリシックに形成するマルチ
周波数高周波メカニカル共振子

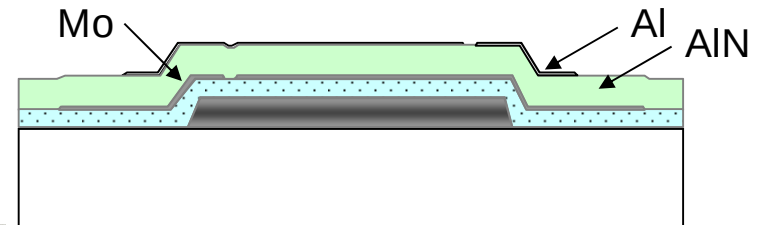
■ クロックを集積化したマルチバンド通信
チップなどへの応用



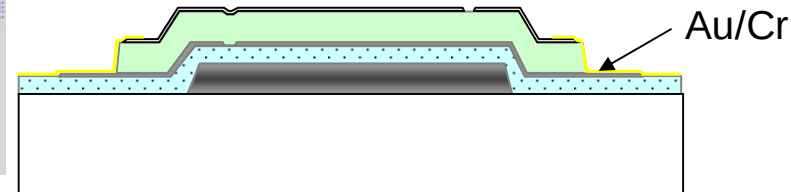
1. Ge patterning and SiO₂ deposition



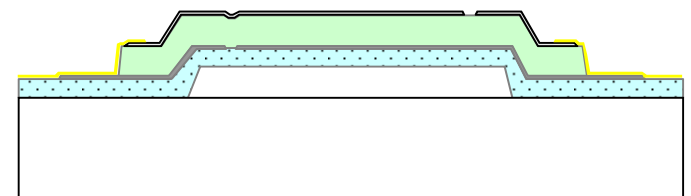
2. Metal patterning and AlN deposition



3. AlN and Au/Cr patterning

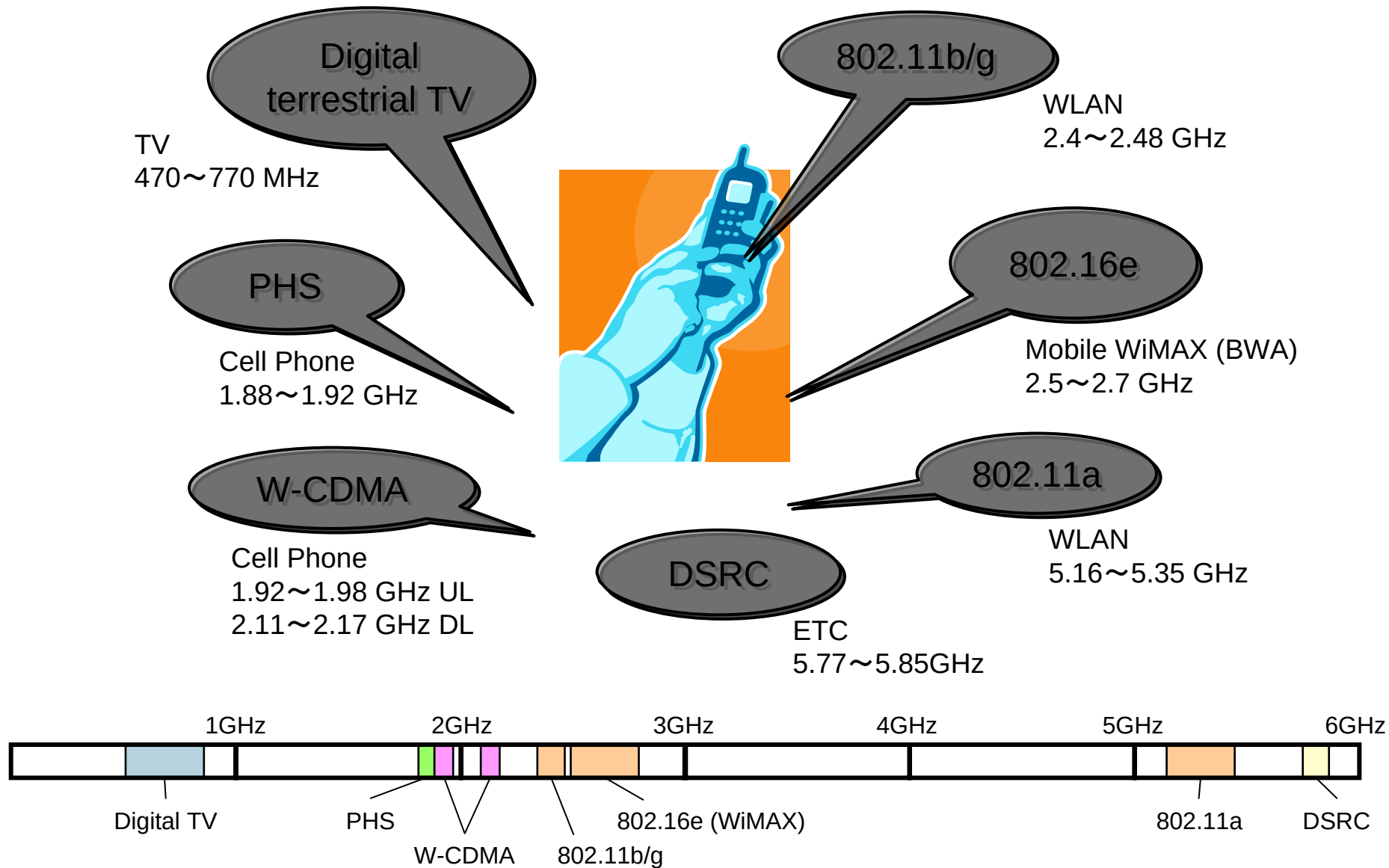


4. Ge sacrificial etching

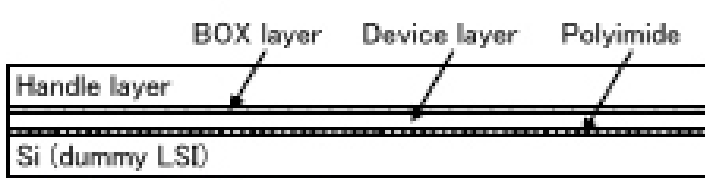


Geを犠牲層に用いるAlN圧電駆動Lamb波共振子

(K.Hirano (日本電波工業株)、2nd International Workshop on Piezo-devices
Based on Latest MEMS Technologies, Tokyo (2008, Sept.8) 111-117)



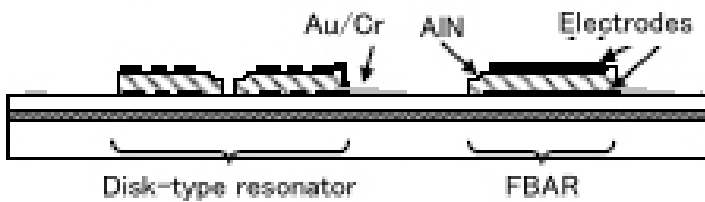
マルチバンド携帯通信器に向けて(国内用)



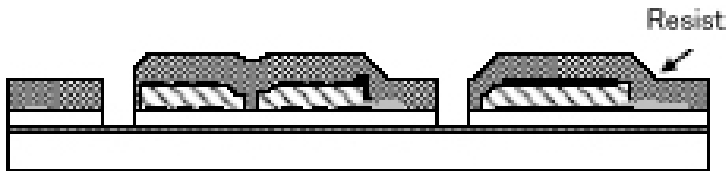
(a) LSI and SOI bonding



(b) Handle layer and BOX layer etching



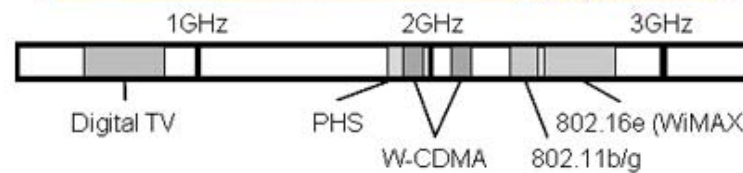
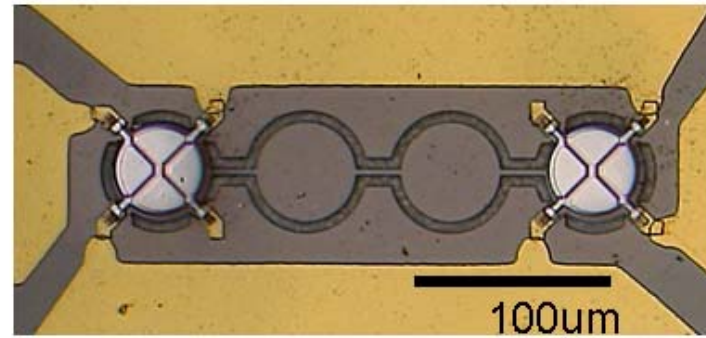
(c) Fabricate MEMS structures



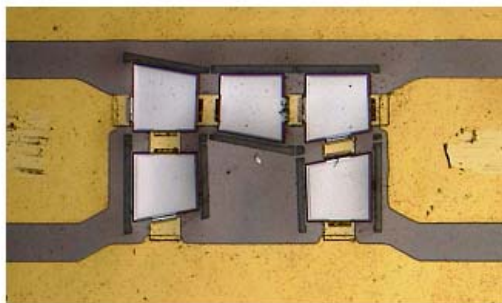
(d) Si RIE



(e) Polyimide ashing to release MEMS structures



ディスク共振子
フィルタ



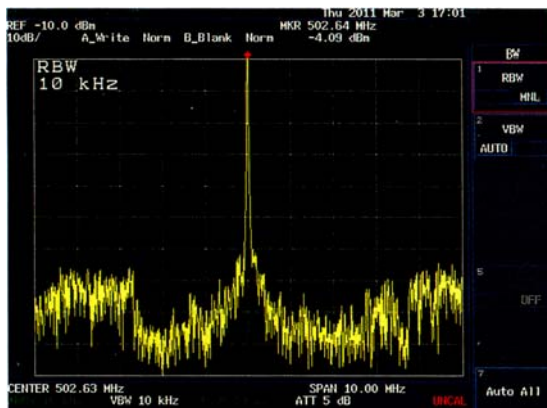
FBAR

(Film Bulk Acoustic Resonator)



ディスク共振子フィルタの共
振モード観察 (293 MHz)
(Polytec 社 高周波レーザドッ
プラ振動計によるイメージング)

マルチバンド携帯通信器用のLSI上に形成できるフィルタ



LSI上SAWフィルタの
発振例 (502 MHz)

16社と共同で乗り合い
として高密度集積回路
(LSI)を製作し、開発の
コストやリスクを削減

1. LiNbO_3 のSiへの接合

紫外線硬化樹脂 LiNbO_3

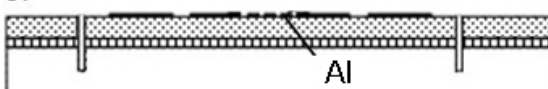


Si (支持基板)

2. LiNbO_3 の研磨

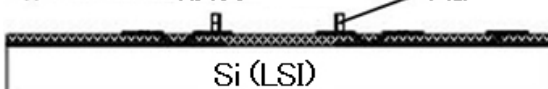


3. Al電極パターン形成と溝加工



Al

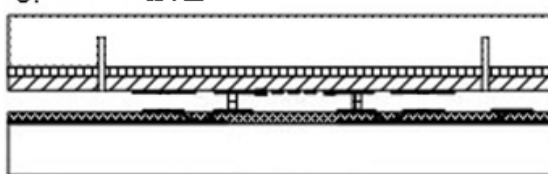
4. Auパンプ形成



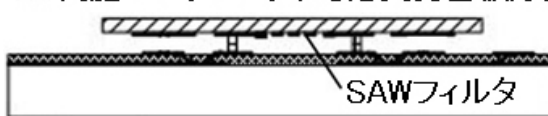
Au

Si (LSI)

5. Au-Au接合

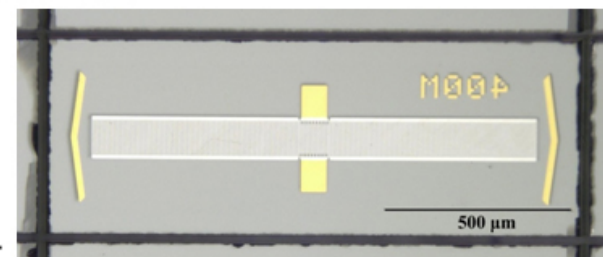


6. 樹脂のアッシングによる支持基板除去

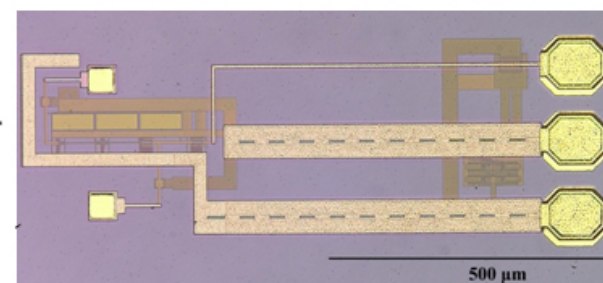


SAWフィルタ

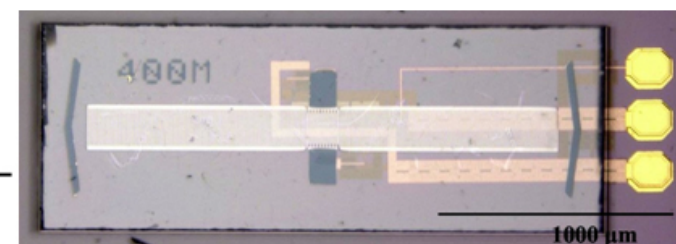
SAWフィルタ



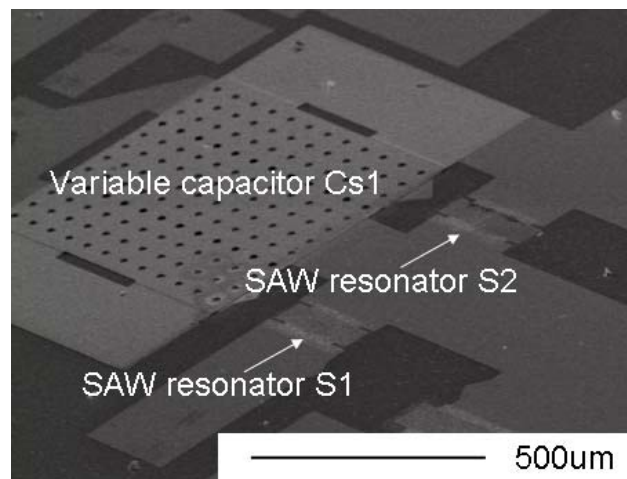
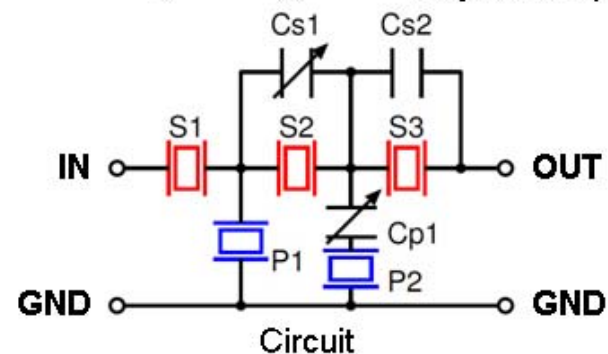
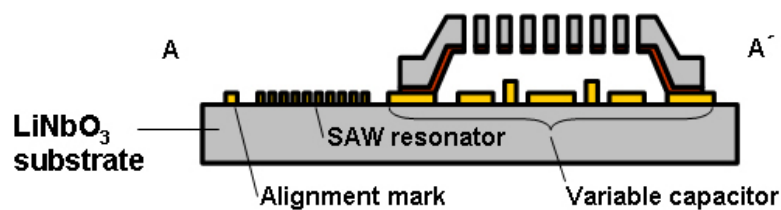
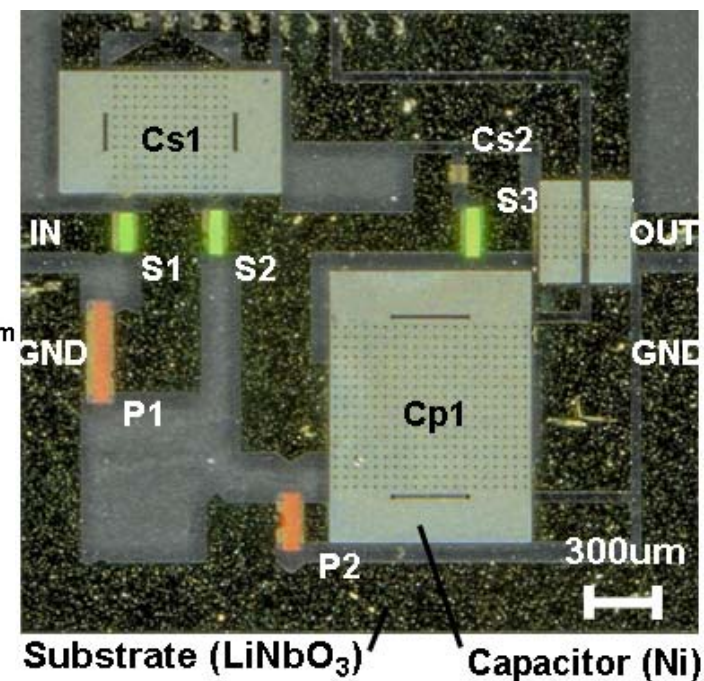
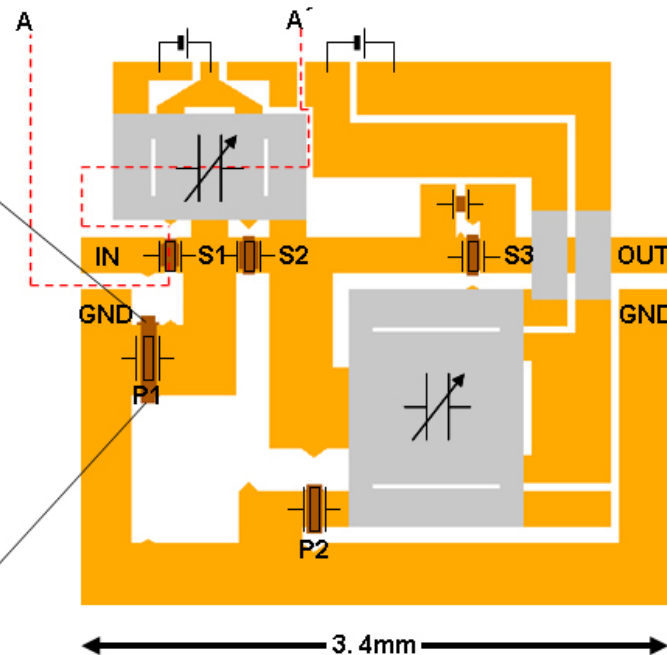
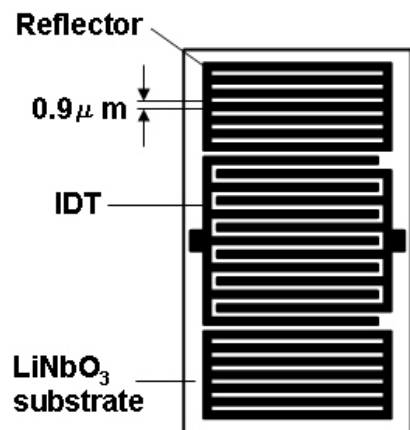
LSI



LSI上のSAWフィルタ



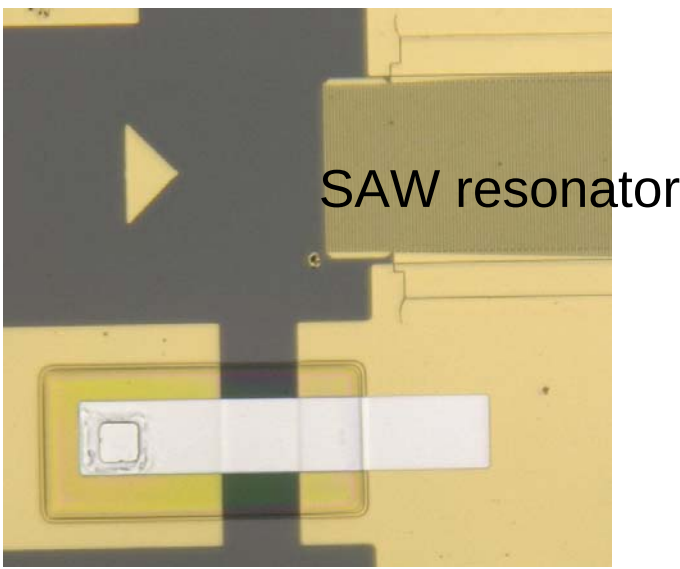
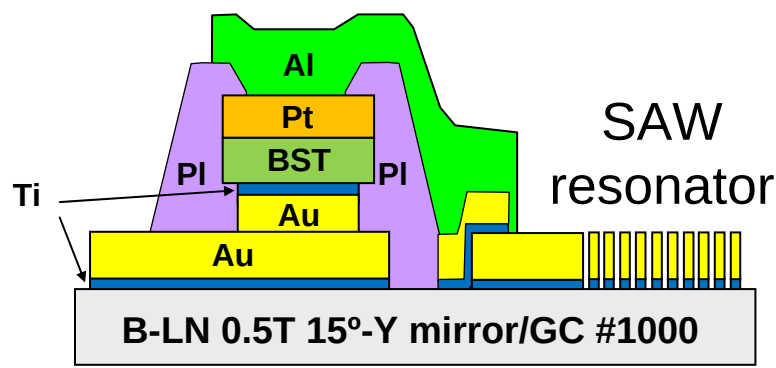
表面弾性波(SAW)素子をLSI上にウェハレベル接合し形成



MEMS可変容量を用いた可変周波数SAWフィルタ

(T.Yasue, Transducers' 2011)

BST ($(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{TiO}_3$) varactor



Transferred BST varactor
(Tuning ratio of 1.6 at 3 V)

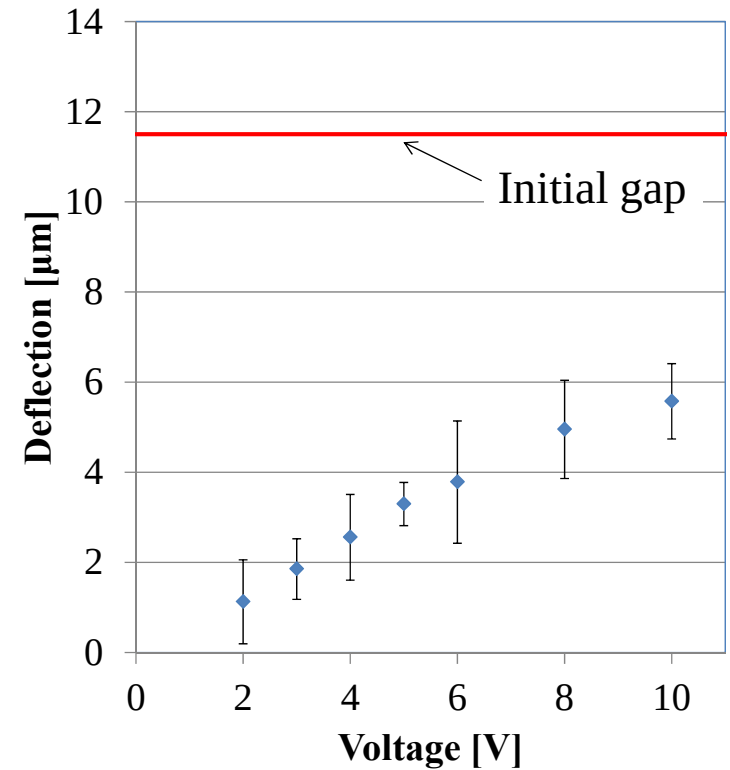
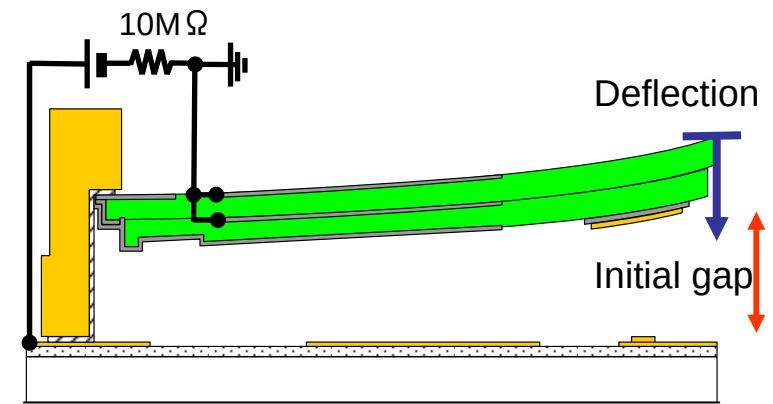
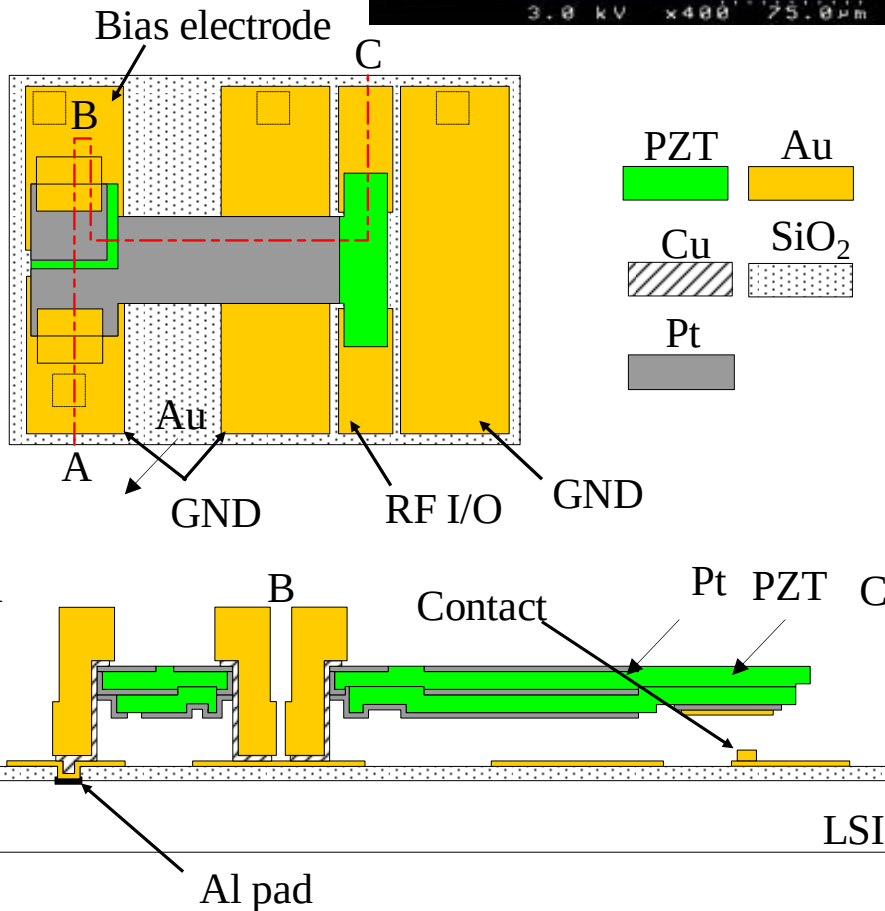
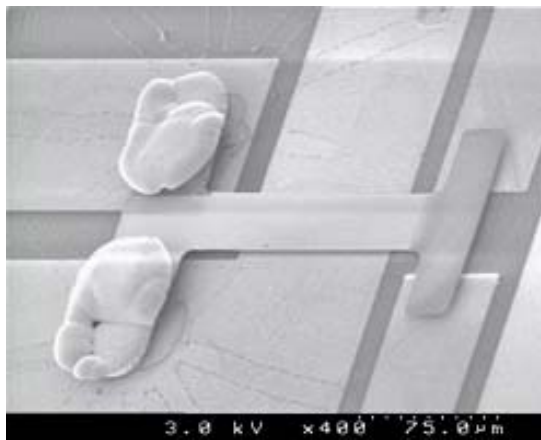
小形の強誘電体バラクタを用いた可変周波数 SAW フィルタ

(H.Hirano, 2011 IEEE Internl, Ultrasonic Symp., (2011))

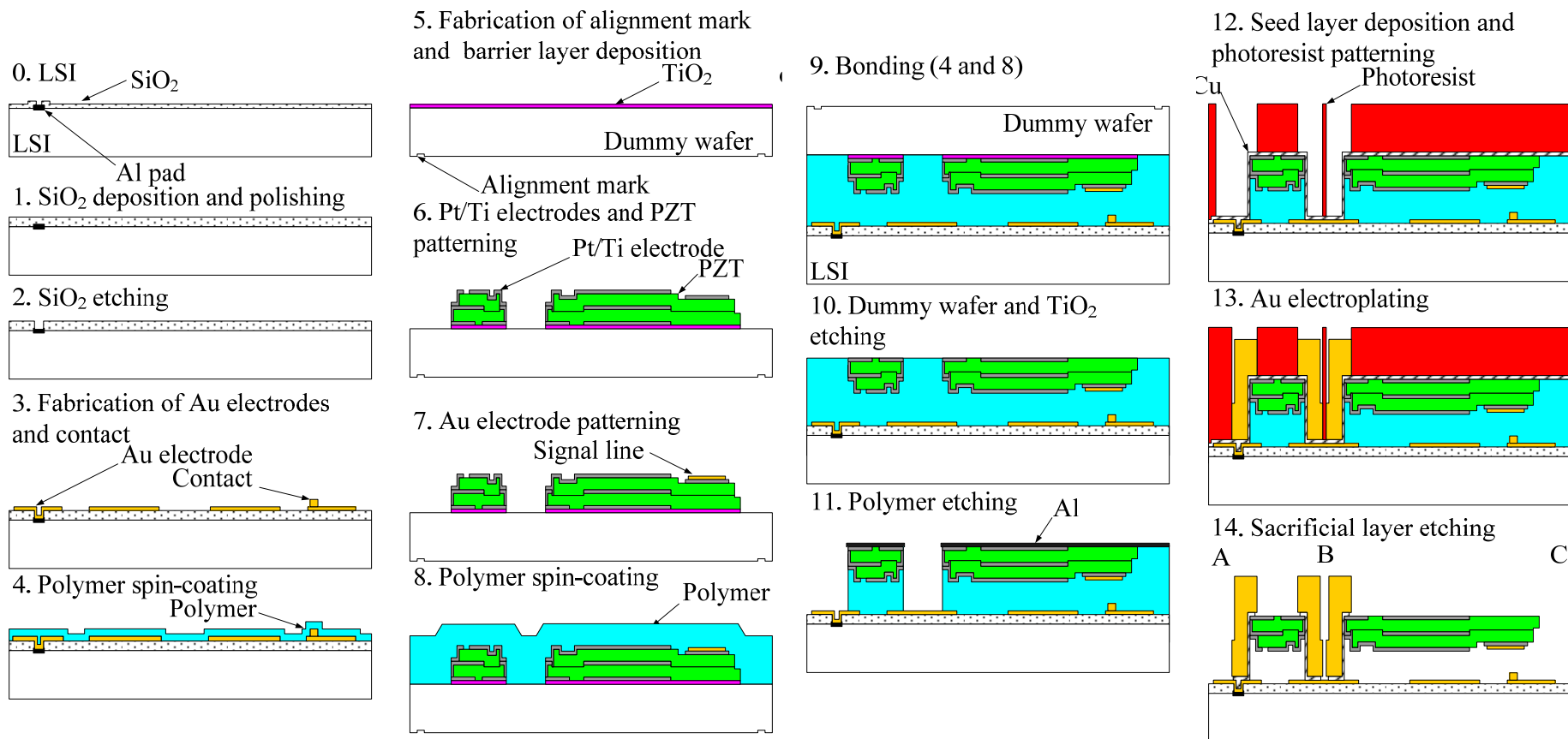
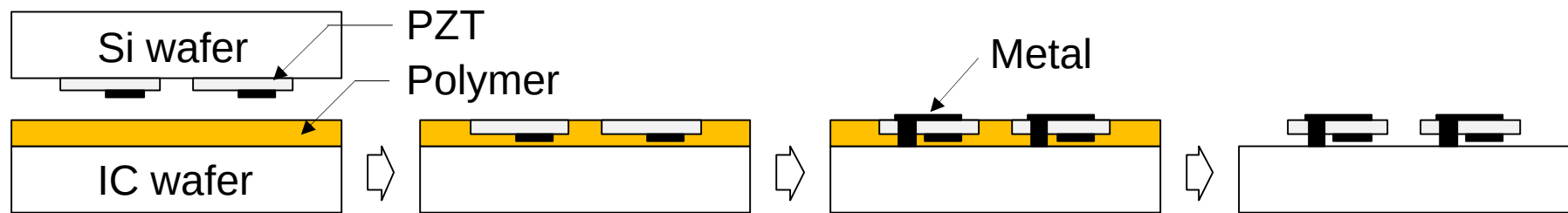
-
- A cross-sectional diagram showing the initial device structure. It consists of a grey 'Si substrate' with a thin 'SiO₂' layer on top. A stack of layers is deposited on the SiO₂: a yellow 'Au' layer, a green 'BST' layer, and a grey 'Pt' layer.
- 1) Deposition and patterning of Pt, BST and Au on Si.
 - 2) Fabrication of IDT and bonding pads.

A cross-sectional diagram showing the IDT and bonding pads on a hatched 'LiNbO₃ substrate'. The top layer is labeled 'Au/Pt/Ti'.
 - 3) Au –Au bonding.

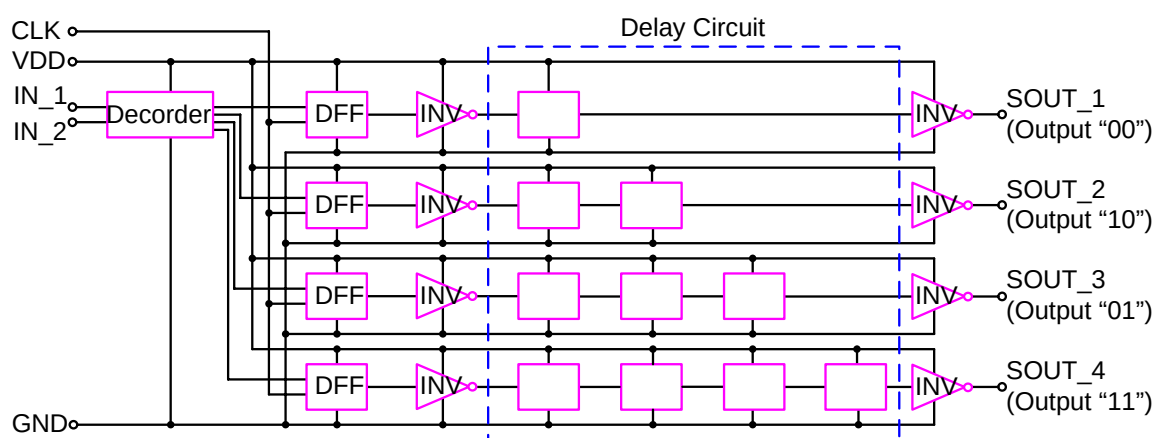
A cross-sectional diagram showing the Au-Au bonding. A 'Polyimide' layer is shown on top of the Au layer, and an 'Al' layer is shown on top of the BST layer.
 - 4) Etching of Si sub. and wiring the IDT and VCs.



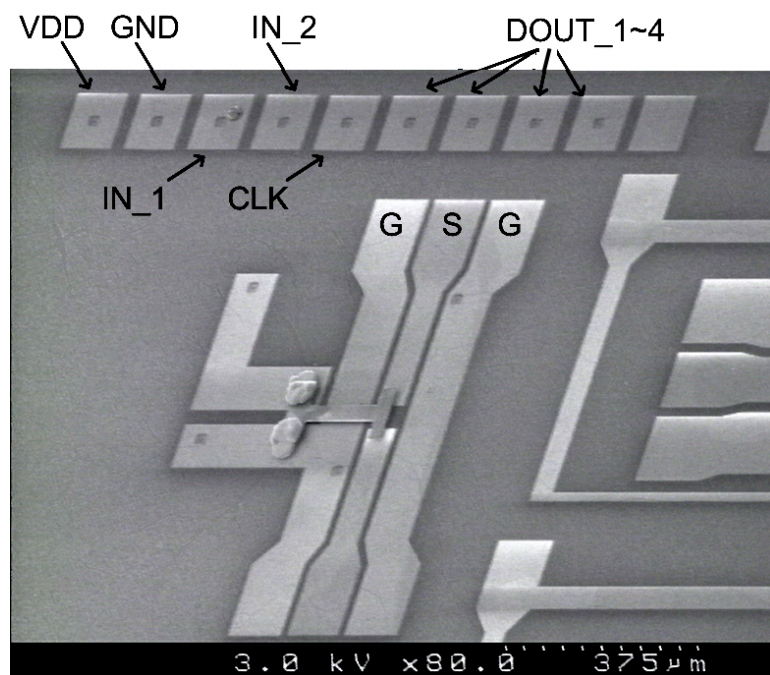
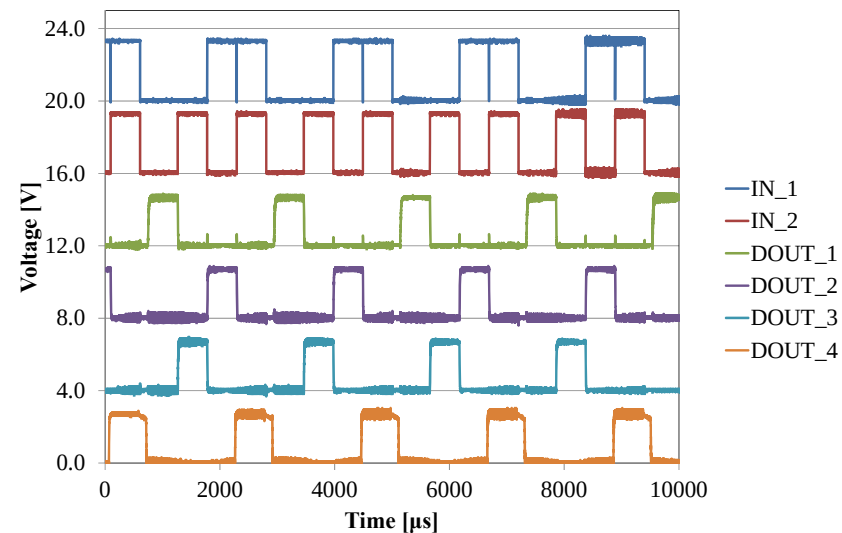
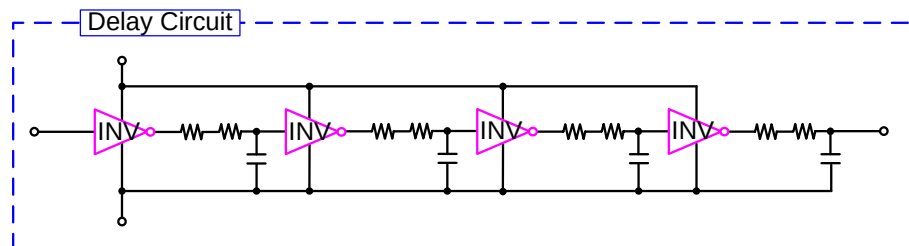
LSI上のPZT MEMS スイッチ



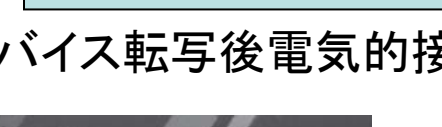
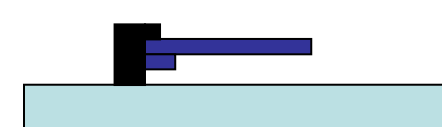
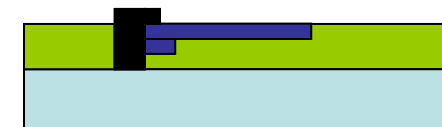
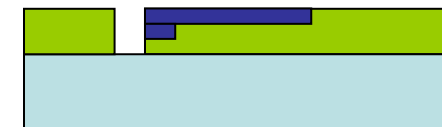
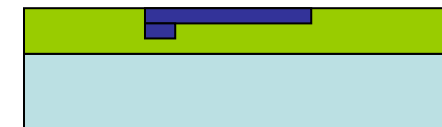
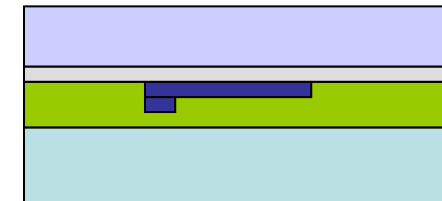
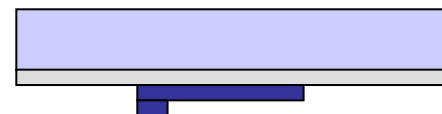
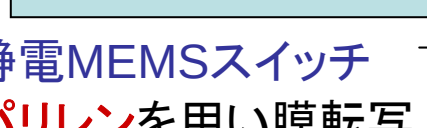
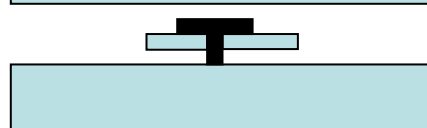
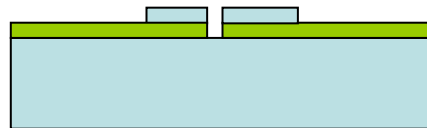
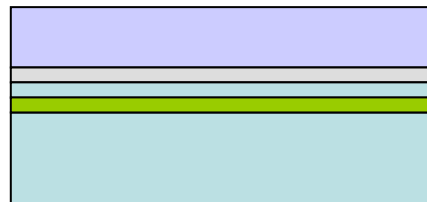
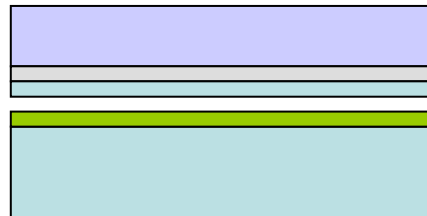
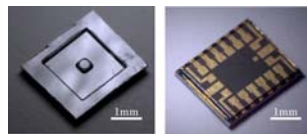
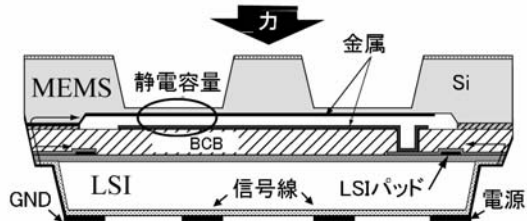
LSI上のPZT MEMS スイッチの製作工程



VDD : power supply, 3.3V
CLK : clock signal, 3.3 V, 5 MHz
IN_1, IN_2 : switching signal, 3.3 V
DOUT_1~4 : D flip-flop's output

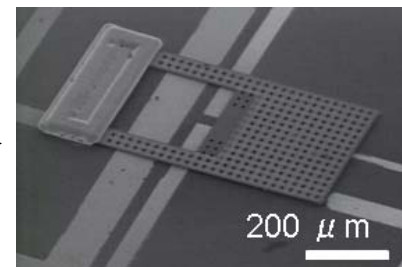


集積化したCMOS スイッチ制御回路



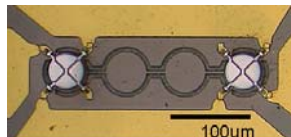
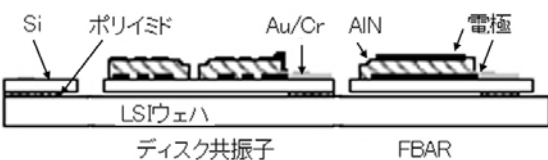
デバイス転写後電氣的接続

静電MEMSスイッチ
パリレンを用い膜転写
(仮接合)後電氣的接続



触覚センサ

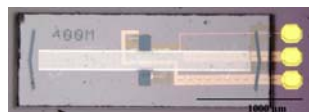
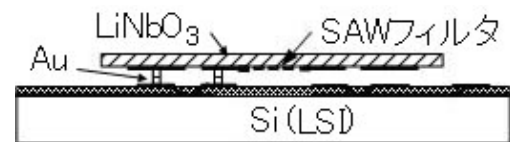
BCB (Benzocyclobuten)による永久接合



マイクロメカニカル共振子

ポリイミドによる接合

接合後部分的に除去

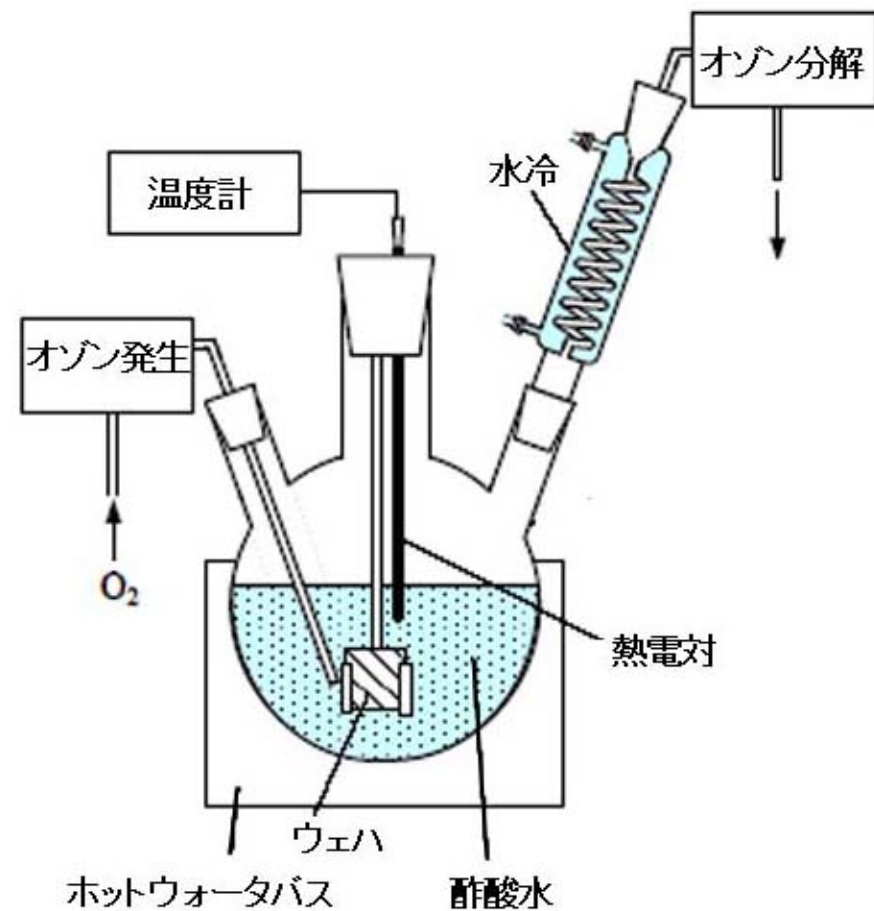
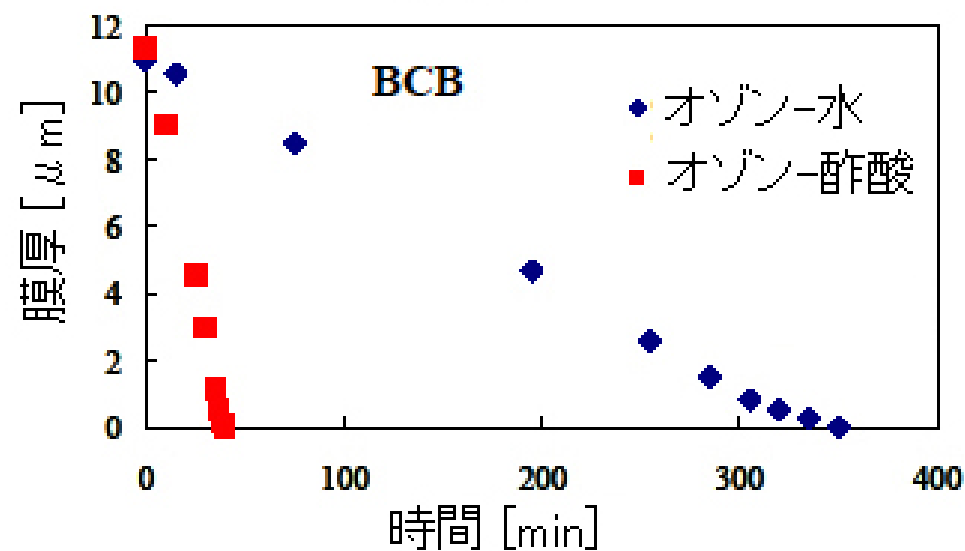
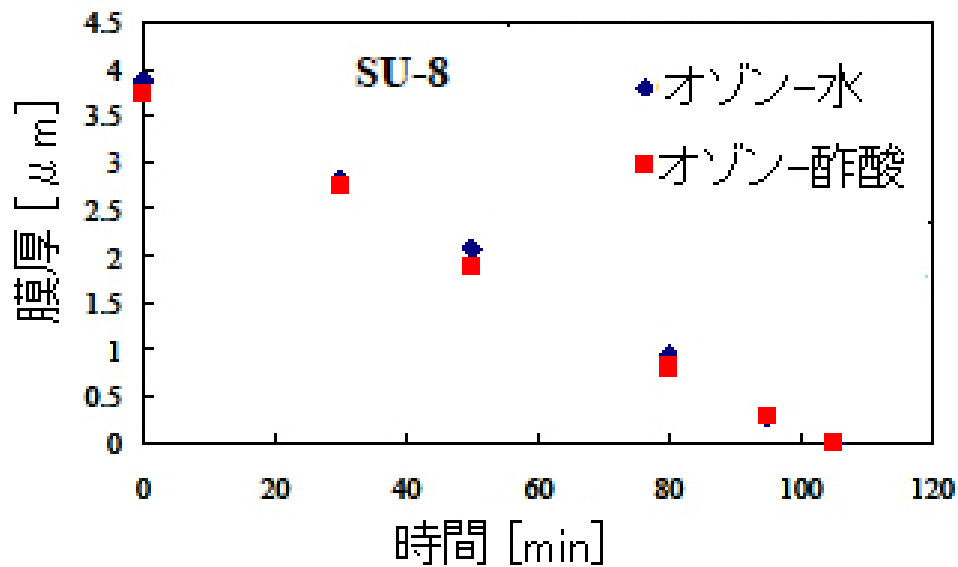


LSI上のSAWフィルタ

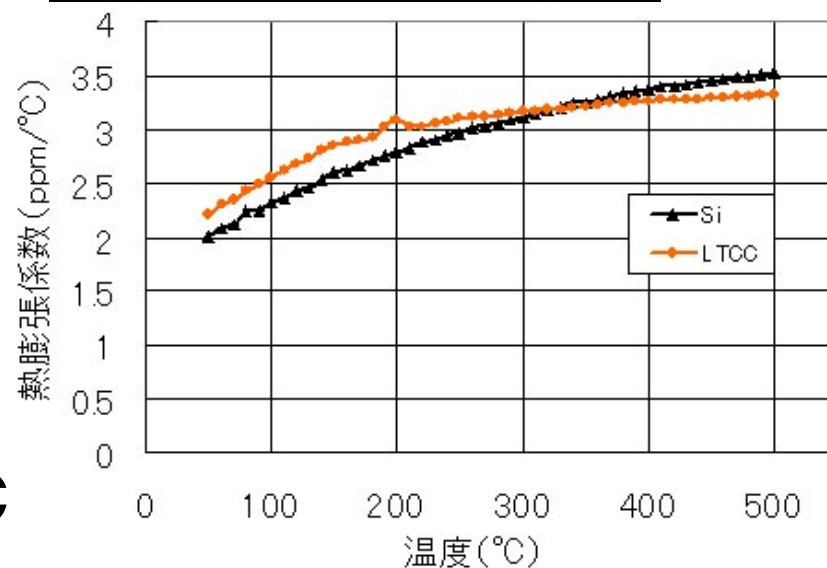
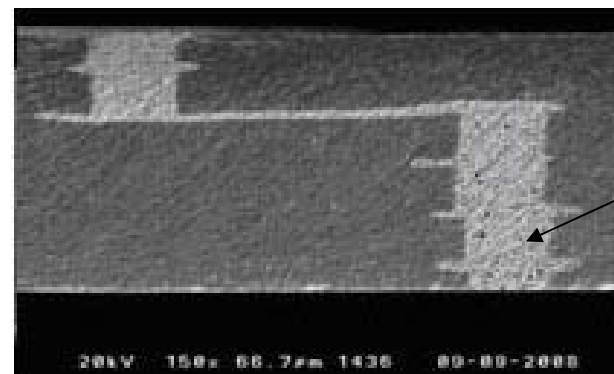
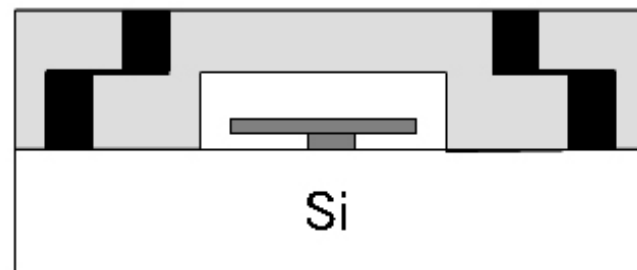
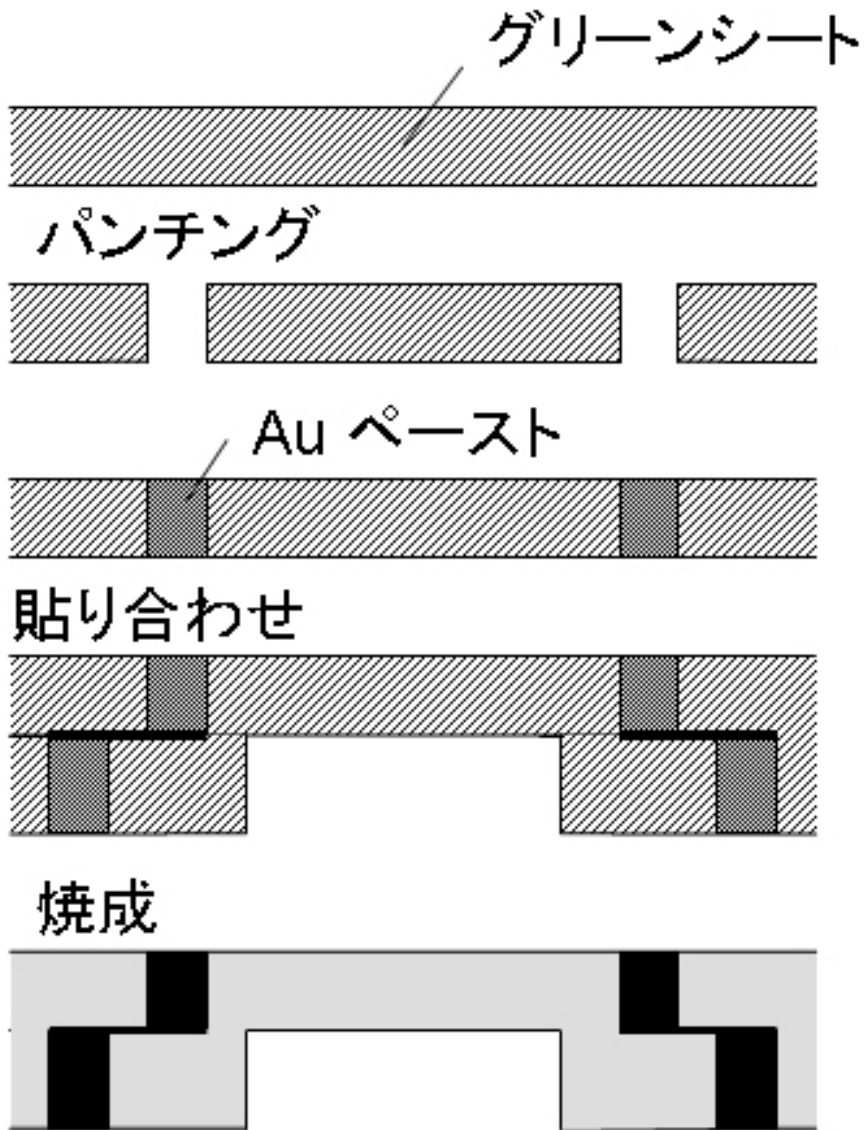
紫外線硬化樹脂による接合

仮接合し後で除去

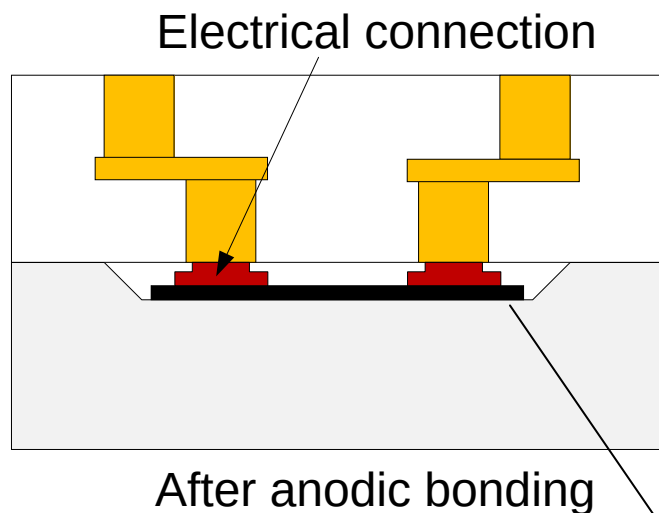
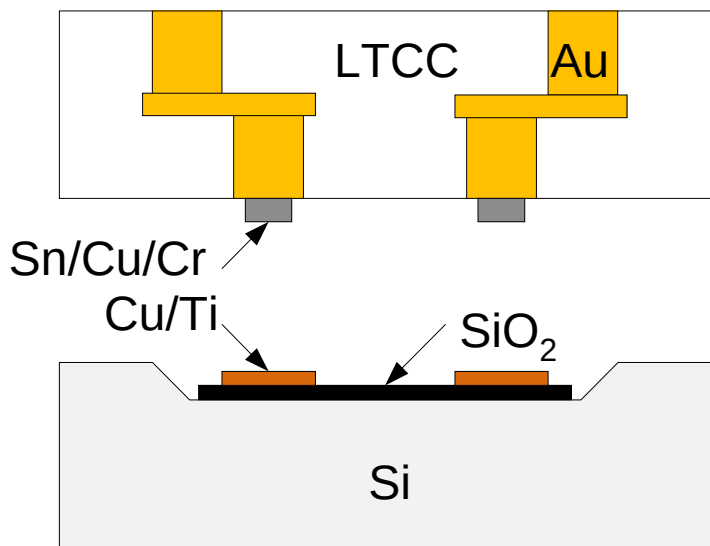
ポリマー接合の適用



オゾン酢酸によるポリマーの除去



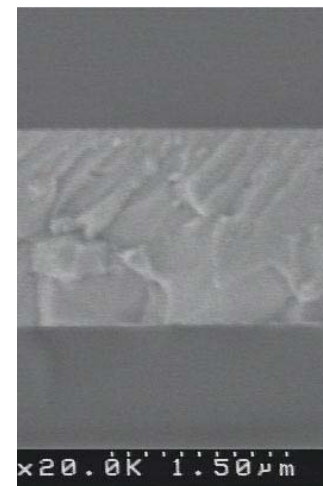
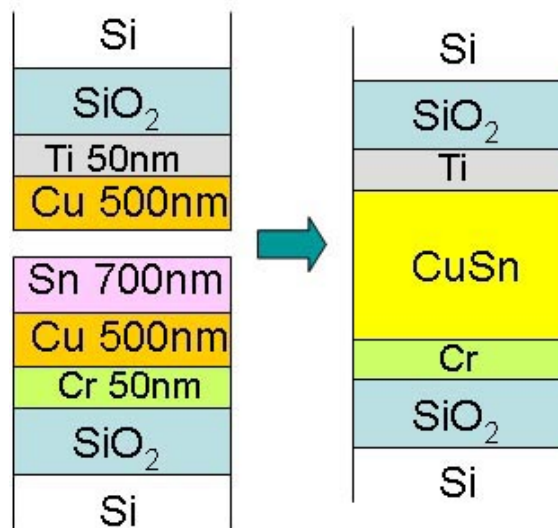
貫通配線付低熱膨張 LTCC



接合金属の融点
以上に短時間加
熱。高さを自己
整合的に調整し、
合金化による融
点上昇前に接合
させる。

• Pre-treatment
formic acid 蟻酸 250°C
5min

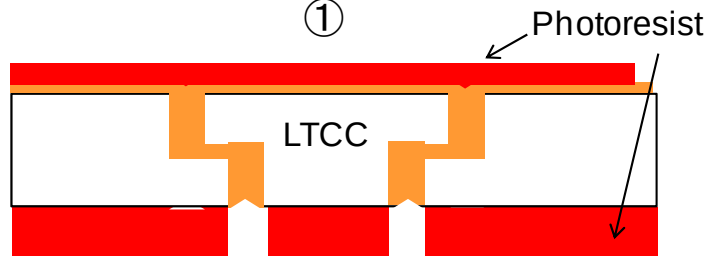
• Bonding condition
Temperature: 350°C
Voltage: -500V
Pressure: 2MPa
Time: 10min



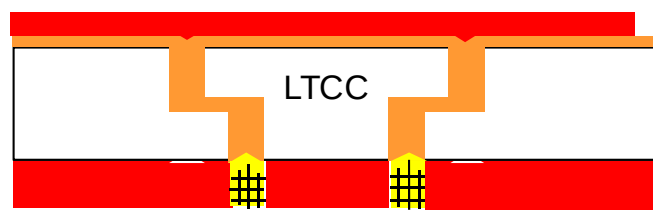
封止と電気接続の同時実現 (Anodic & TLP Bonding)



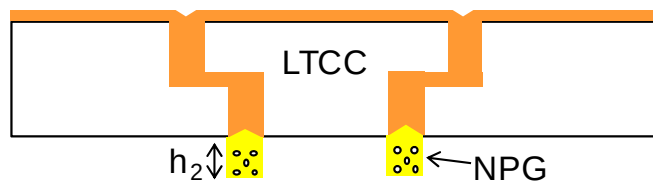
①



②



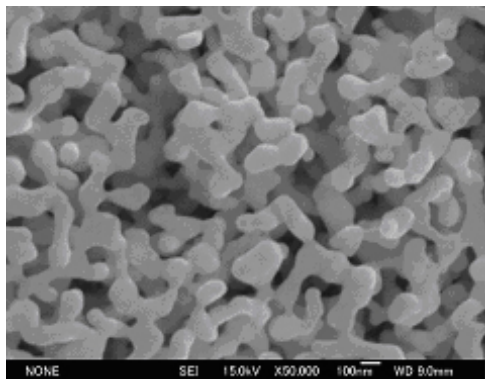
③



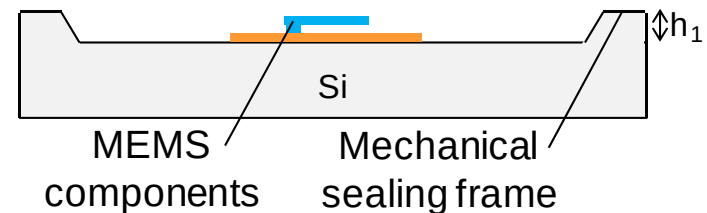
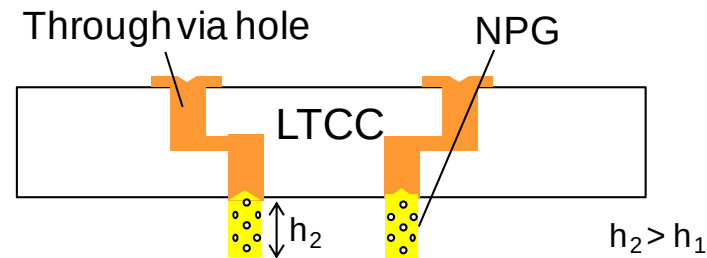
④

Electroplating

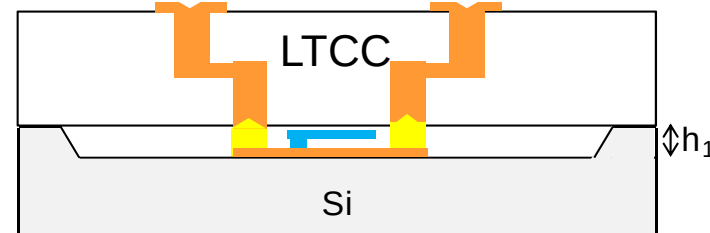
Dealloying
(dissolution of Sn)



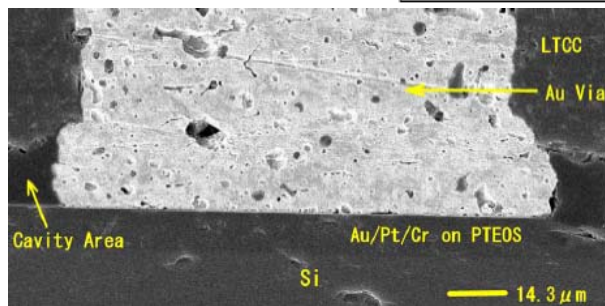
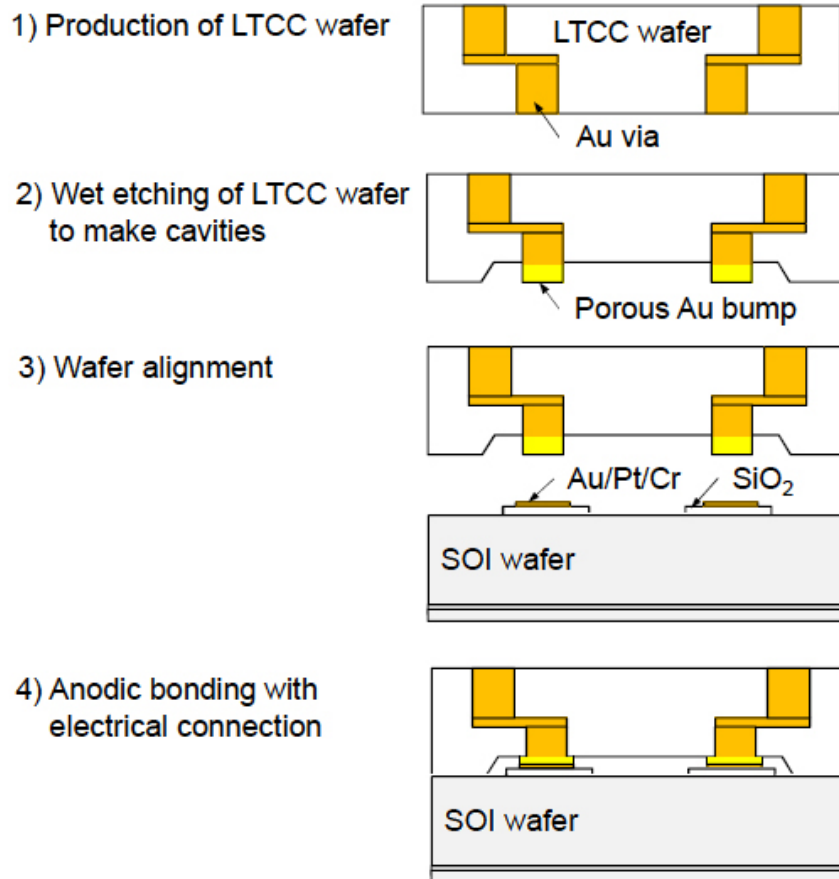
ナノポーラス金(NPG)を用いた陽極接合時の電気接続

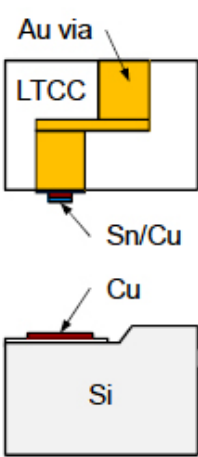
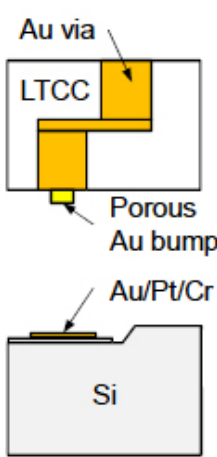
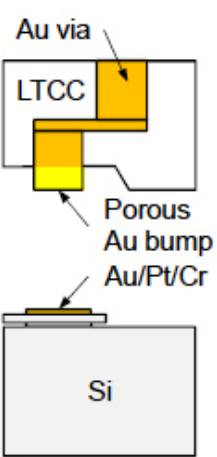


Pressure, voltage and heat



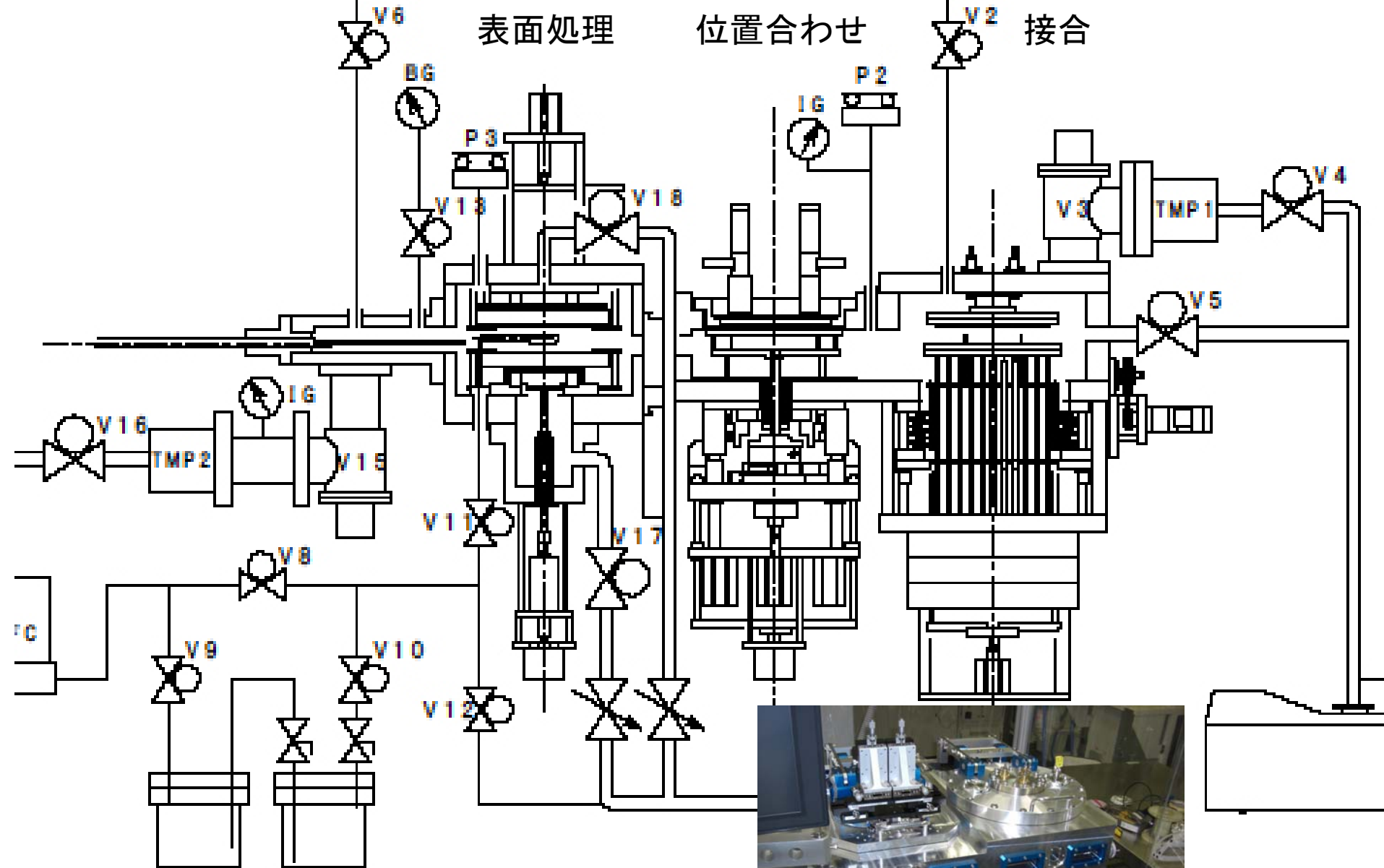
陽極接合時にナノポーラスシリコンが圧縮され高さの差を吸収



	Sn-Cu TLP bonding	Porous Au bump (Submicron Au particle)	Porous Au bump (LTCC wet etching)
Structure			
Advantage	Simple process No special material	Large tolerance to thickness and depth errors	Simple process No special material Large tolerance to thickness and depth errors Cavity for MEMS
Disadvantage	Complex behavior of metal diffusion	Special material and non-standard process	Limitation of bump size and pitch

3方法の比較

LTCCのキャビティ形成時のエッチングで多孔質金を形成する方法

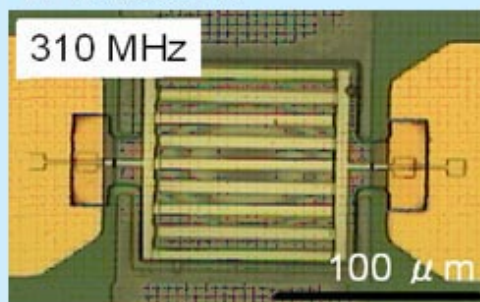


開発中の接合装置



次世代携帯機器グループ

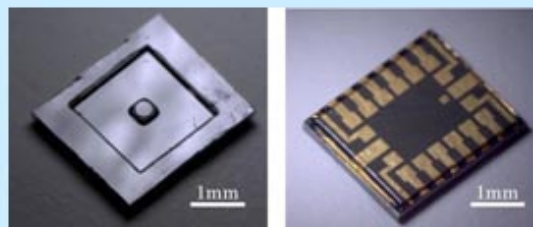
湯上, 田中, 山口, 遠藤, 井口
トッパン・テクニカル・デザインセンター,
日本電波工業



マルチ周波数Lamb波発振器
(日本電波工業)

センサネットワーク・ 高機能センサグループ

三浦, 桑野, 小野, 田中, 長澤, 室山
北川鉄工所, 住友精密工業,
日本電産コパル電子, トヨタ自動車,
豊田中研, パイオニア



ロボット用触覚センサネットワーク

光マイクロシステムグループ

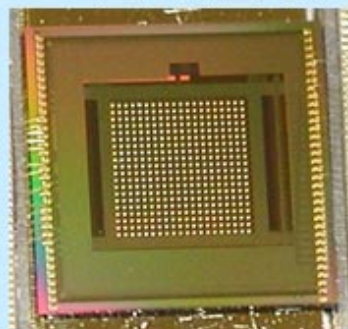
羽根, 金森, 川合
リコー, 日本信号, トヨタ自動車
豊田中研, 古河電工



GaN LED付スキャナ (羽根)

バイオ・医療 マイクロシステムグループ

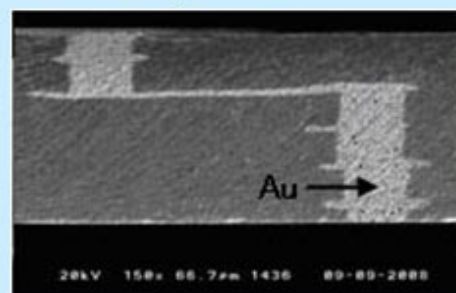
末永, 西澤, 芳賀, 珠玖
メムザス, 日本航空電子工業



バイオLSI (末永)

製造・検査装置グループ

寒川, 江刺, 三浦, 山口, 小野,
遠藤, 熊野, 宮下
メムス・コア, ニッコー



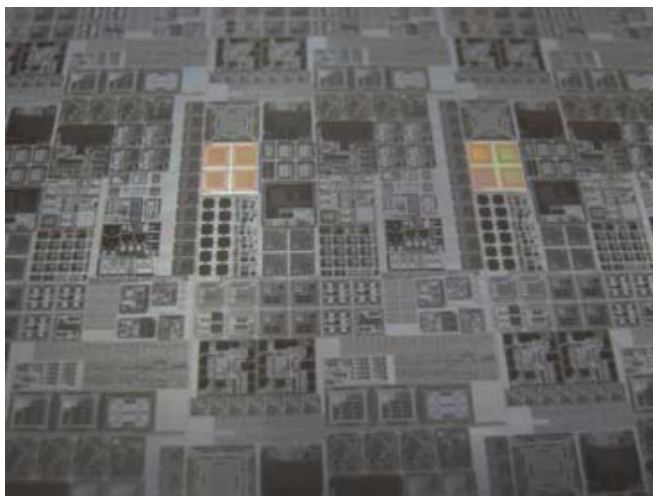
貫通配線付LTCC (ニッコー)

技術社会システム検討 ワーキンググループ

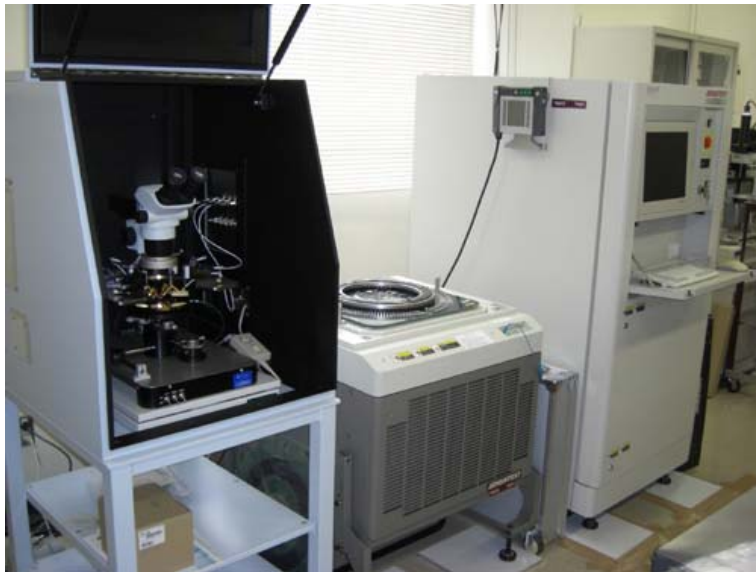
原山, 塩谷, 川合, 宮下, 松崎,
協働機関メンバ 他



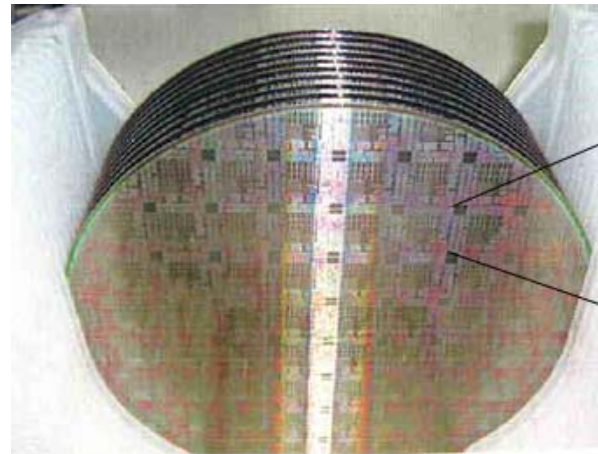
パテント共有
産産学連携システム



台湾TSMCで提供する、他社のチップを
レーザで溶かして見えなくするサービス



LSIテスタ（作ったチップは測定評価し、設計・
試作だけして論文にするようなことはしない）



乗り合いウェハ

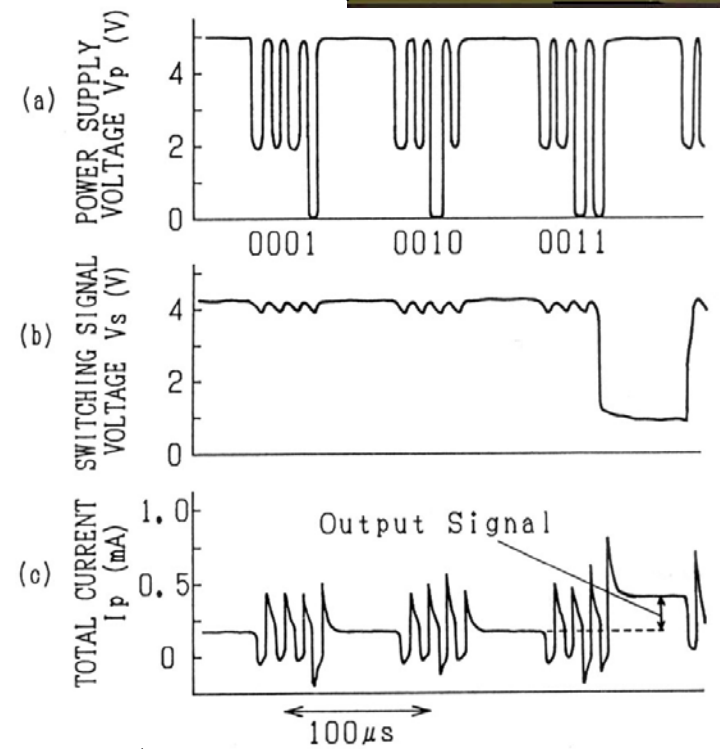
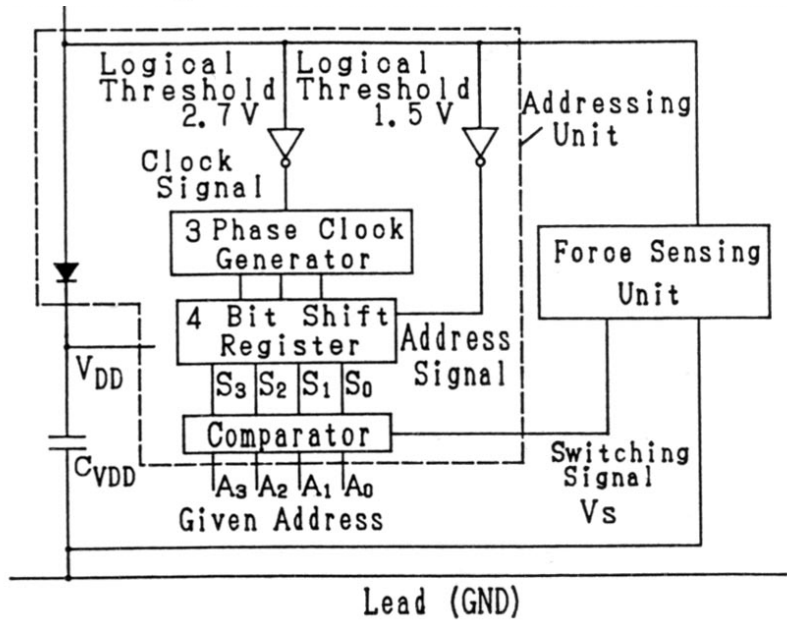
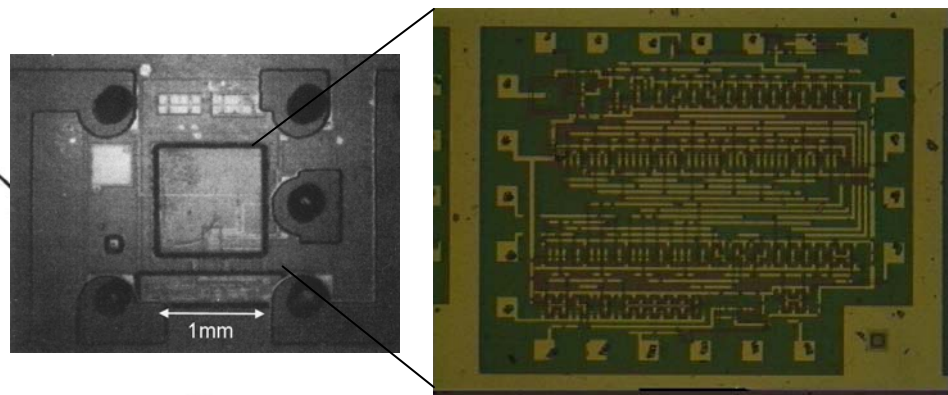
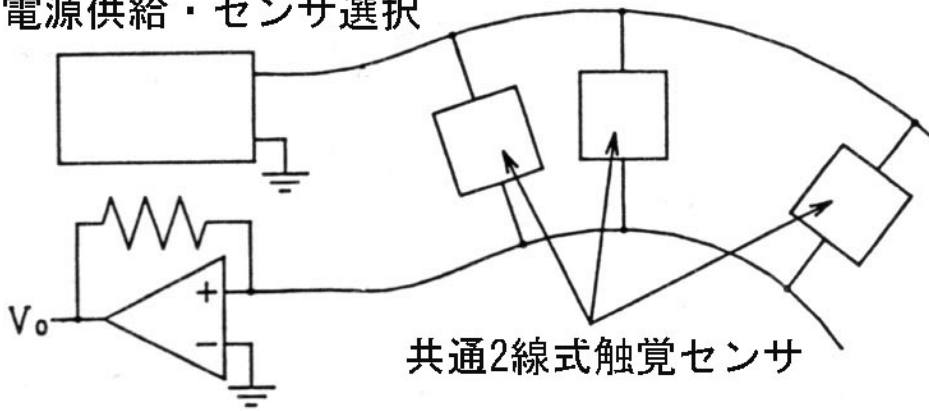
ステッパの露光面積に各プロジェクトの
チップが入るようにLSIファウンダリで試作。

そのウェハに追工程(堆積、接合など低温
プロセス)でMEMSを形成。

他社のチップが同一ウェハに入っていても
協働機関16社は競合せず、協定を結んで
いるので問題ない。

LSI設計・試作・テスト

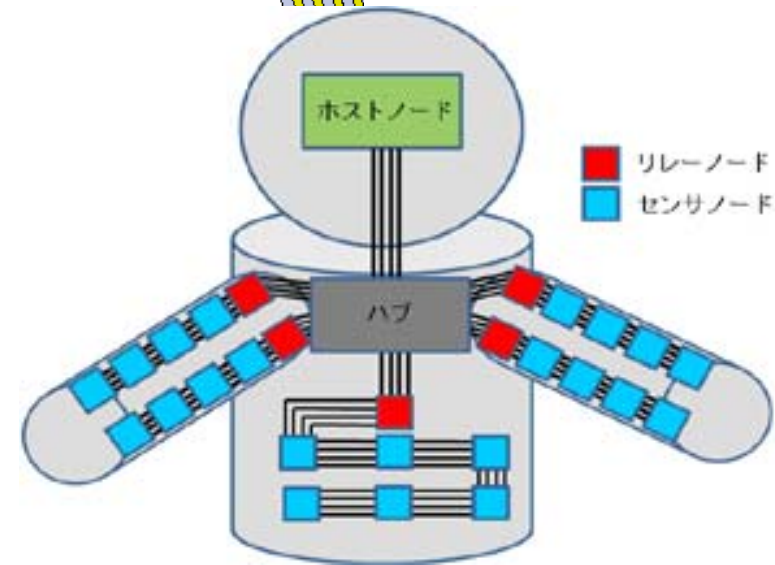
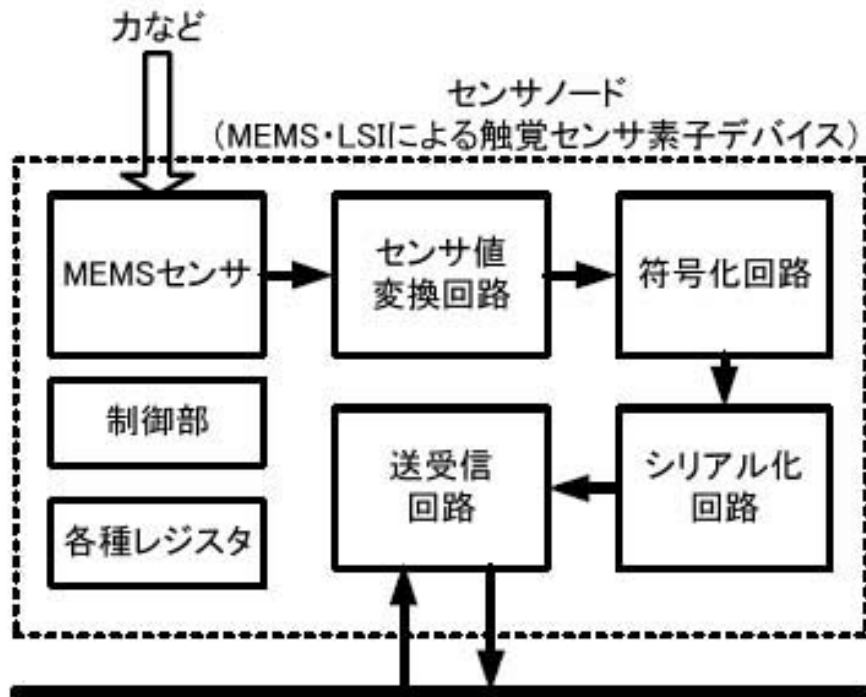
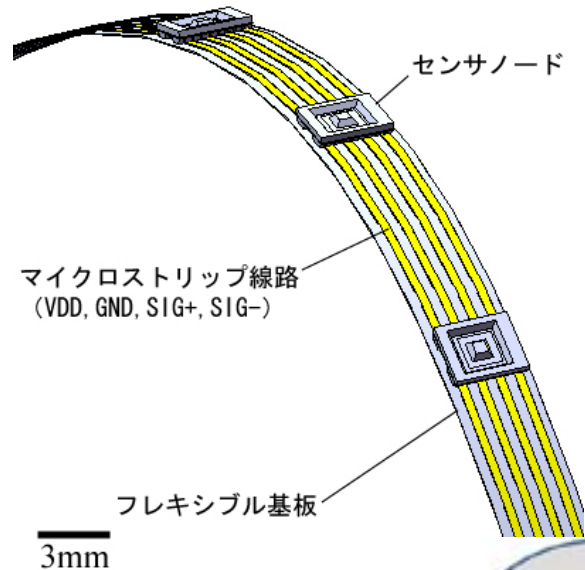
電源供給・センサ選択



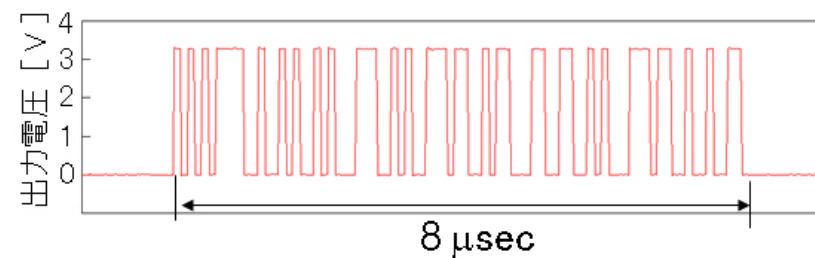
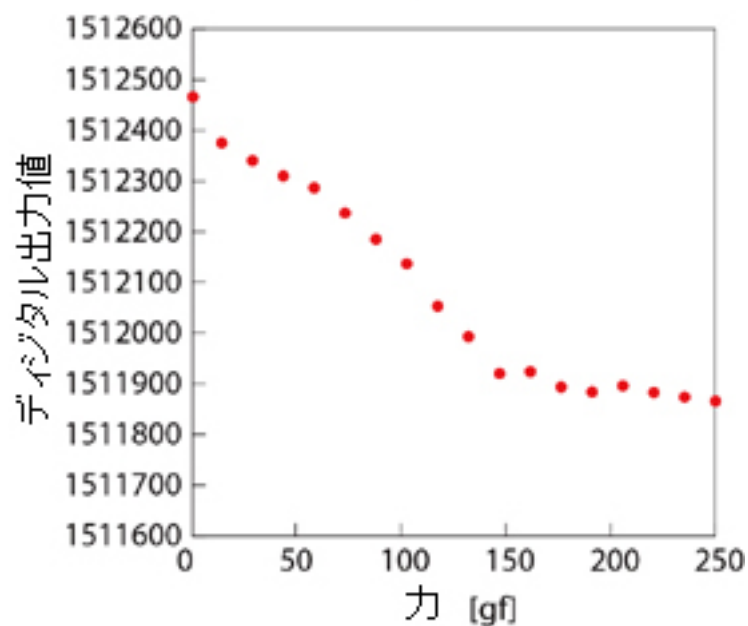
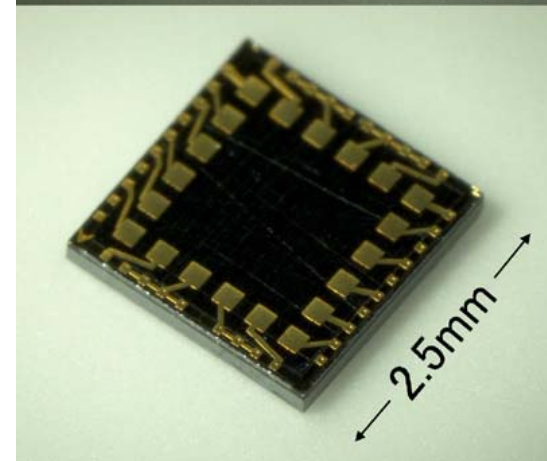
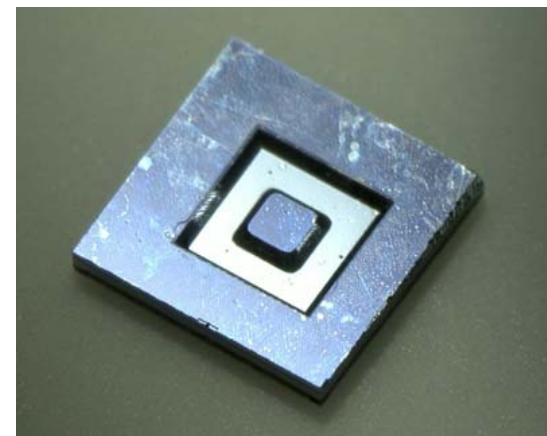
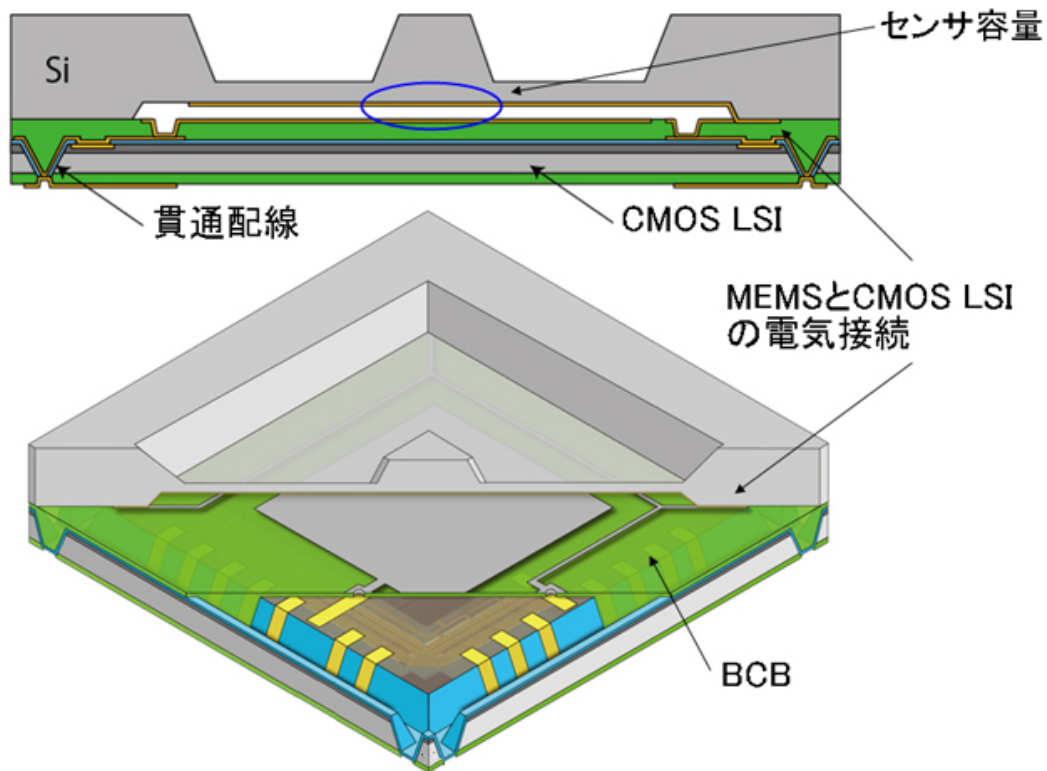
共通2線式触覚センサアレイ (ポーリング型)

(22年前研究室で自作した集積回路、トランジスタ数は最大1000個/チップ
(企業では、当時100万個/チップ、現在100億個/チップ))

(小林真司,三井隆,江刺正喜, センサ技術, vol.10, no10, pp.32-35, Oct.1990.)



人と接触する安全なロボット用の触覚センサネットワーク (イベントドリブン、割込型)



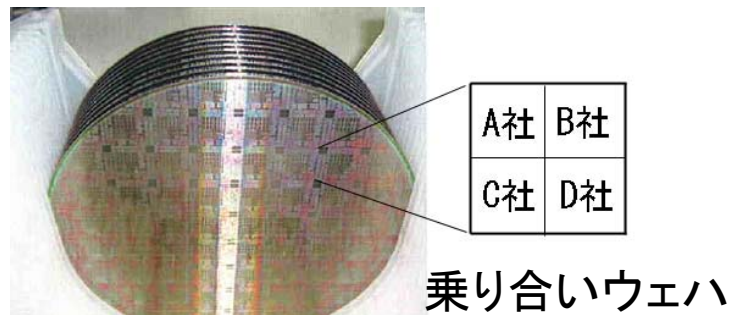
通信信号波形

(M.Makihata et.al., 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Fransisco (2012/4/9)) 80

→ 試作開発を低コストで可能にする「**乗り合いウェハ**」で、開発リスクを抑える。

先端融合領域イノベーション創出拠点の形成
(2007-2016)

「マイクロシステム融合研究開発拠点」



→ 多様な異種要素を一体化する「**ヘテロ集積化**」を可能にし、高付加価値化する。

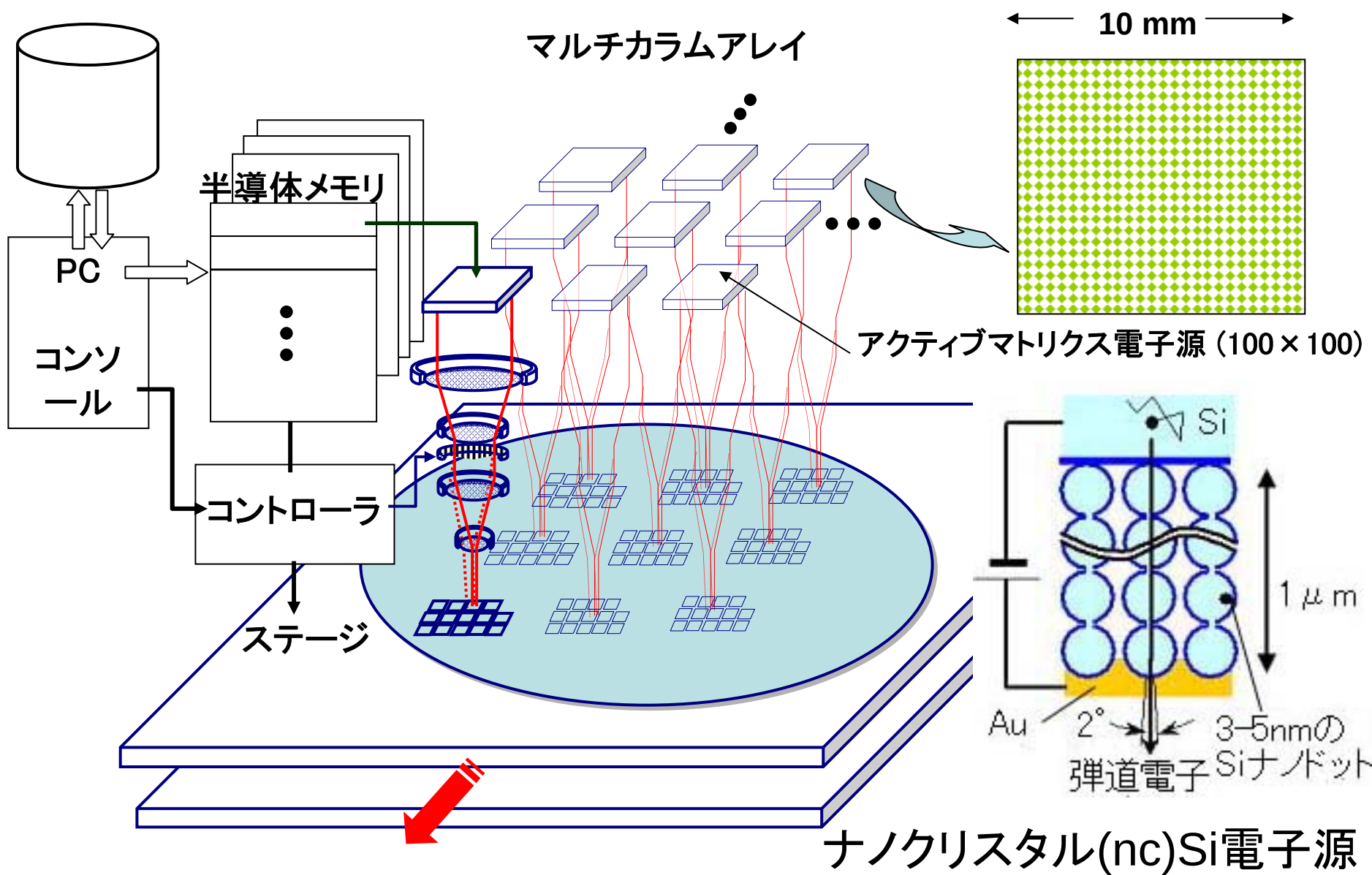
→ 「**超並列電子線描画装置**」を開発し、多品種少量LSIをマスクレスで実現する。

→ 「**試作コインランドリー**」で設備を持たなくても開発できるようにし、参入障壁を下げる。

最先端研究開発支援 プログラム (2010-2013) <http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/index.html>

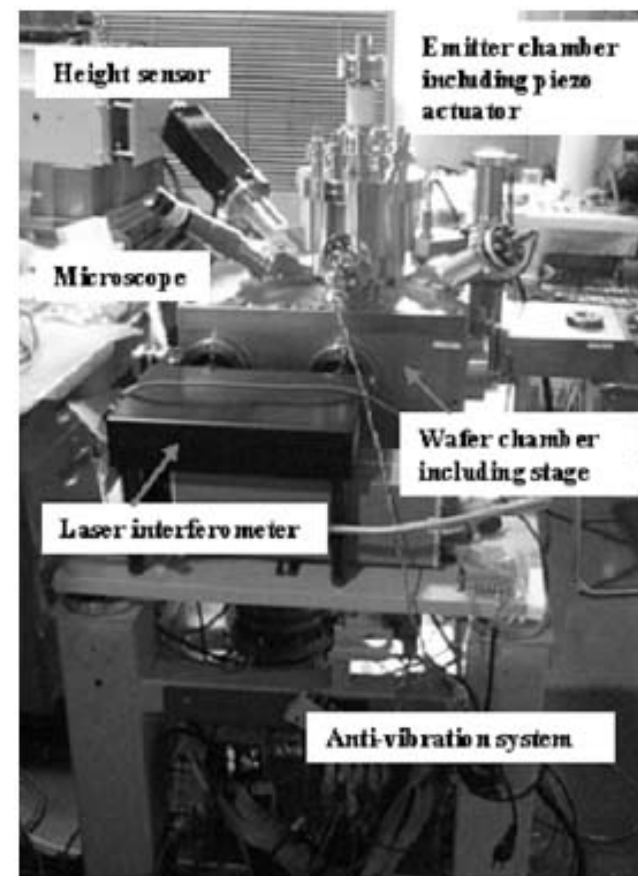
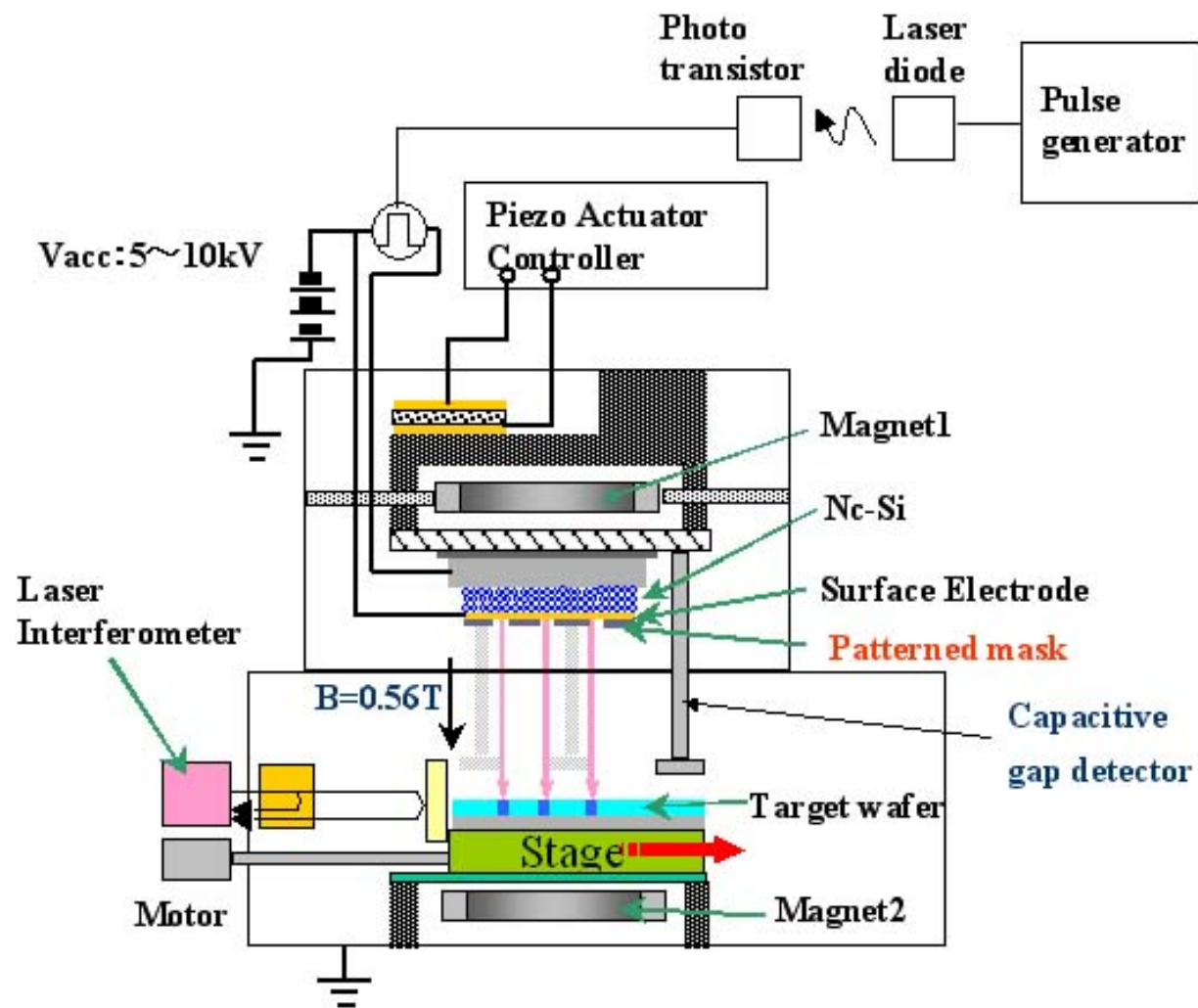
「マイクロシステム融合研究開発」

微細化・高密度化した集積回路の 経済性での行き詰まりを打破 81

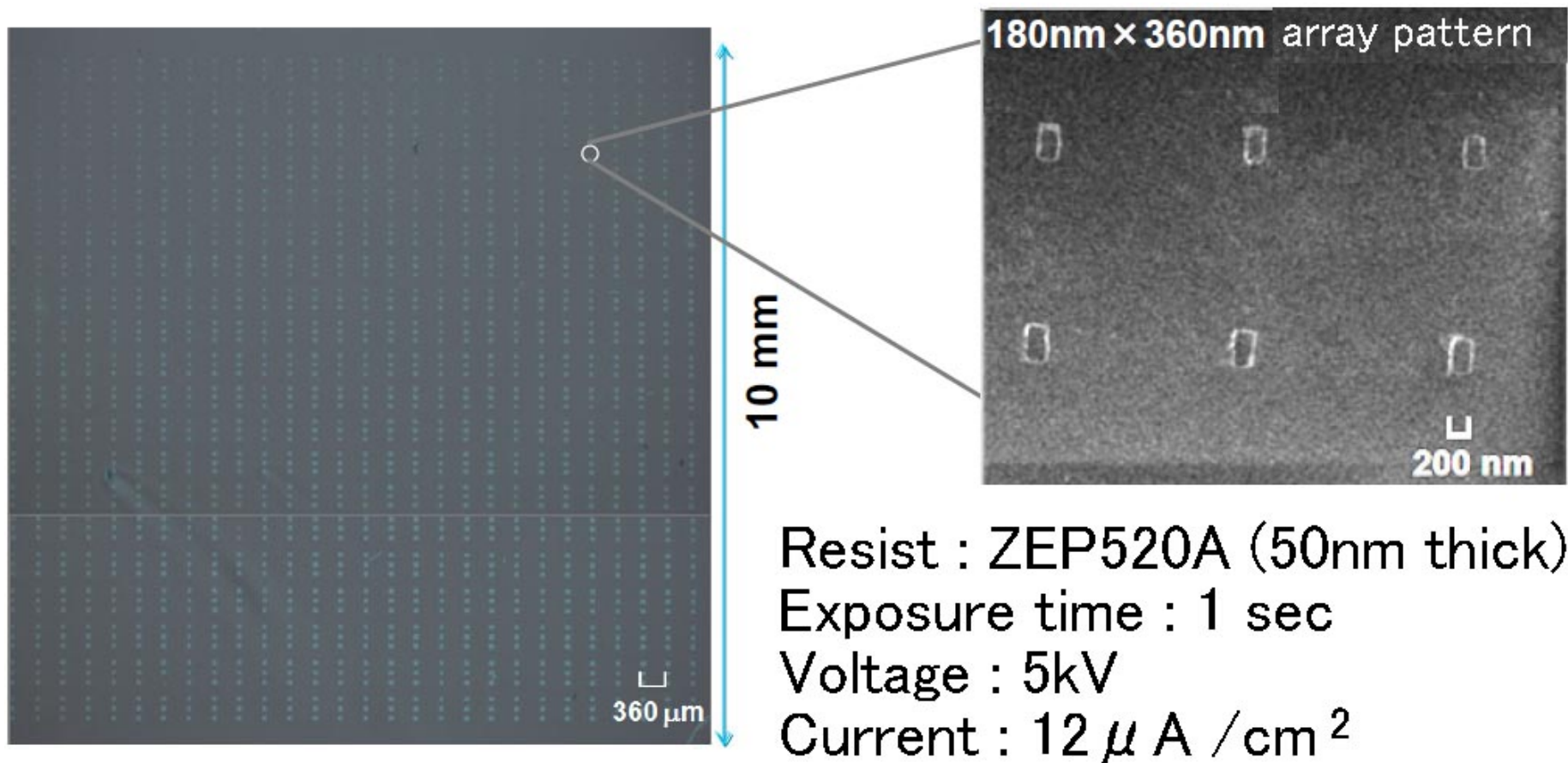


超並列電子線描画装置

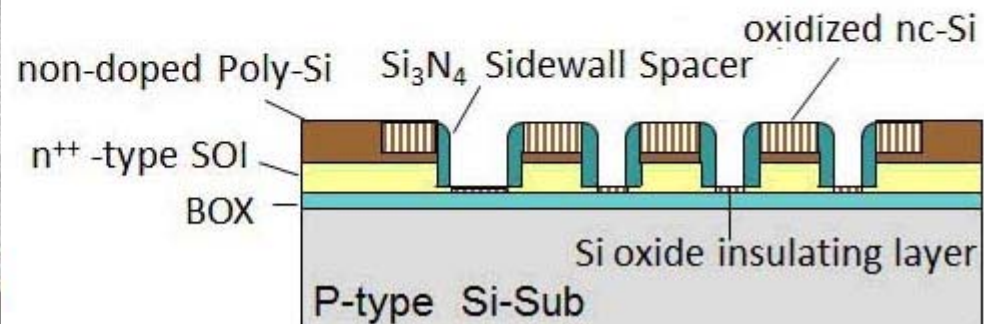
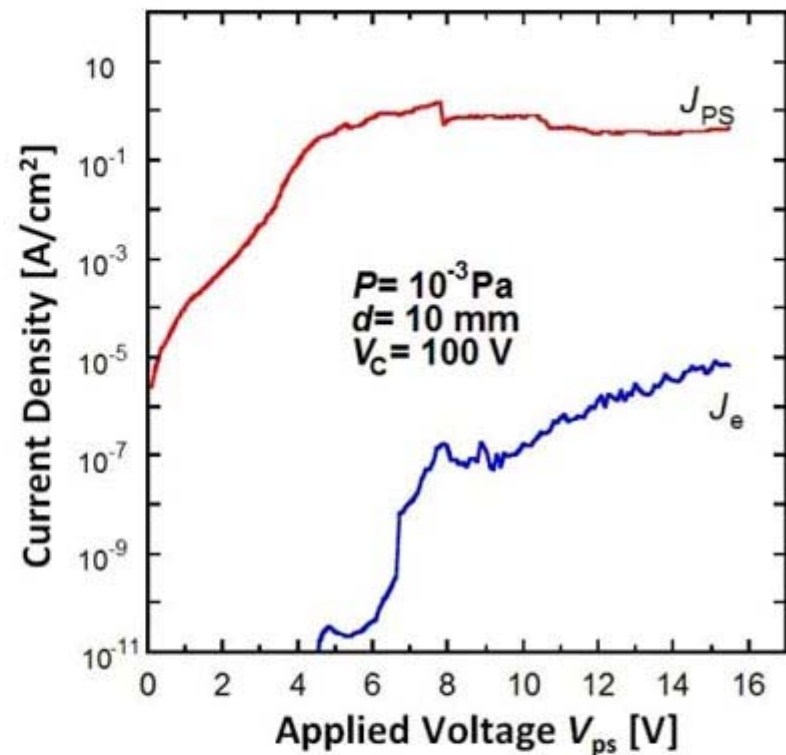
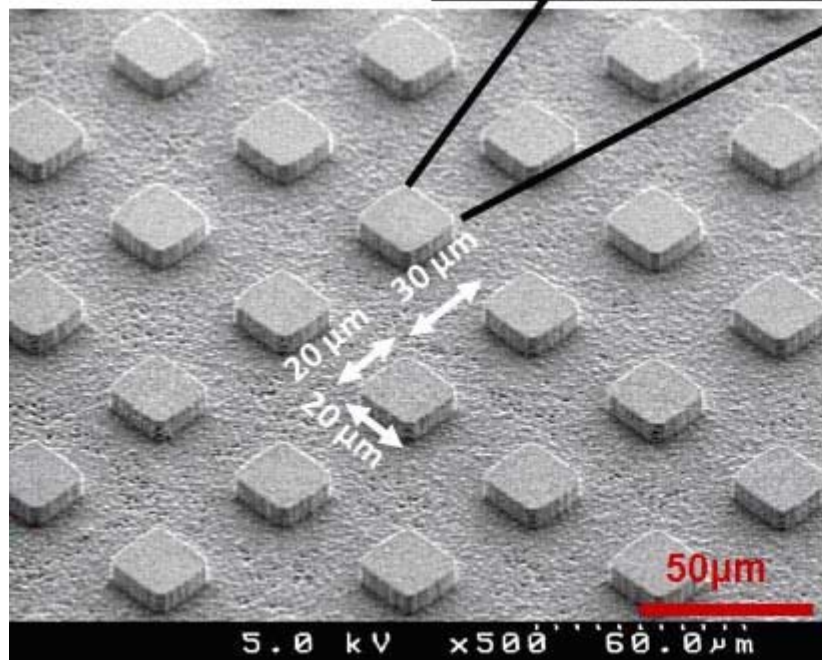
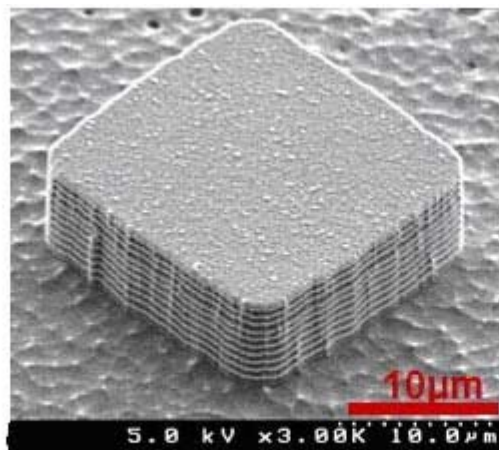
(A Kojima, H. Ohyi and N. Koshida (クレステック、東京農工大), J. Vac. Sci. Technol., B26, 6 (2008) 2064)



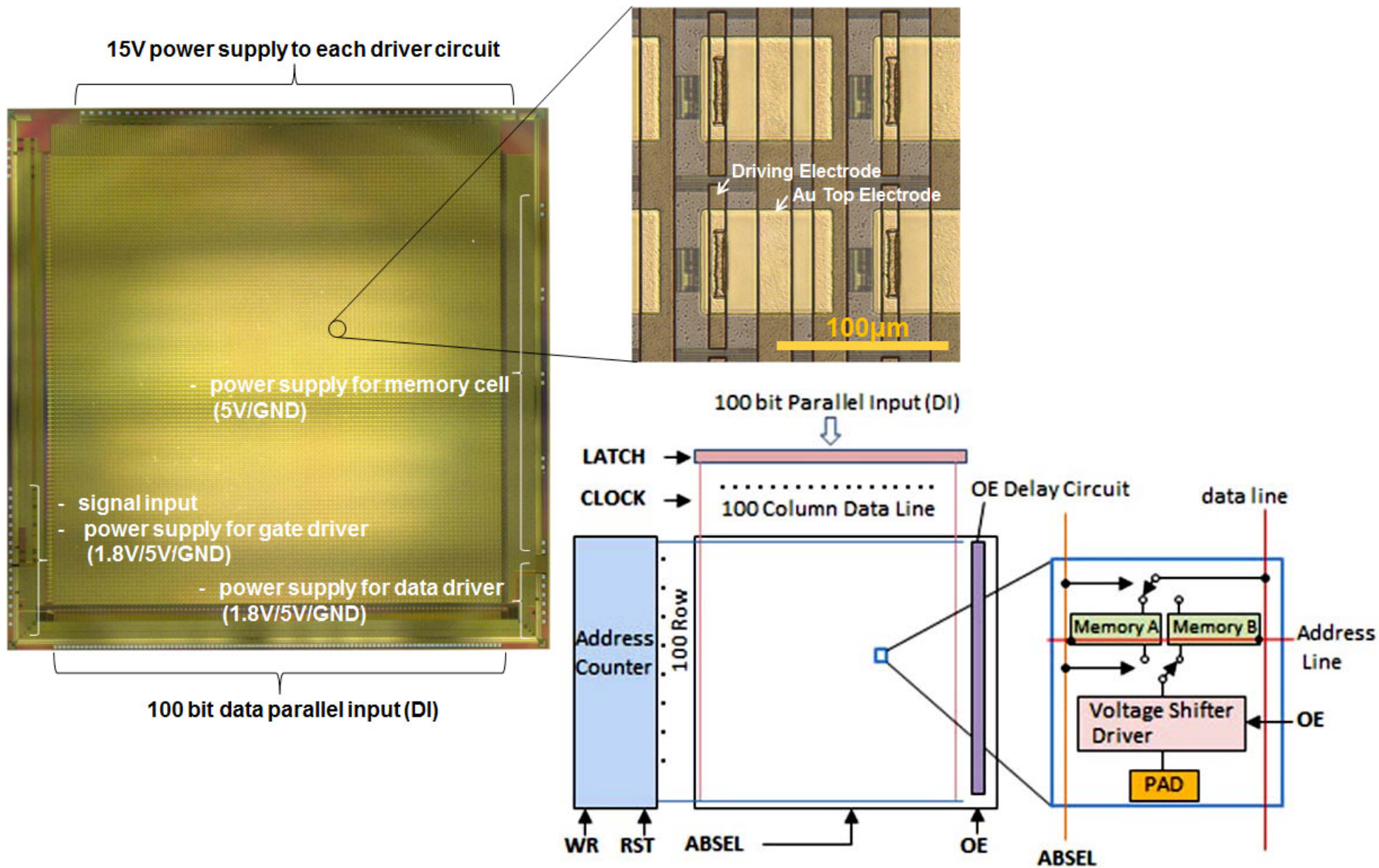
nc- Si を用いた1:1 プロジェクション露光システム (ステツパ)



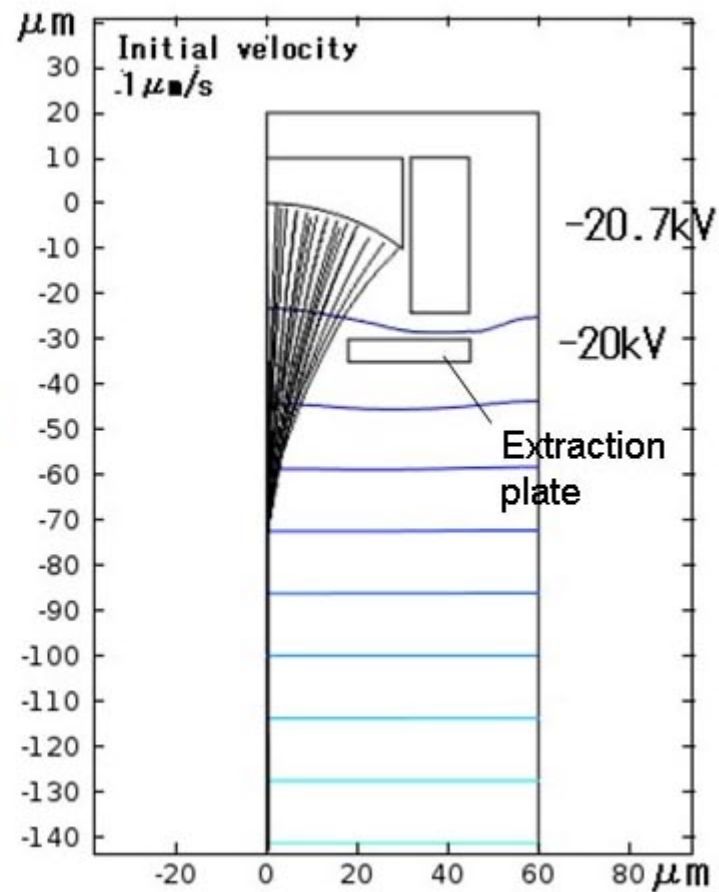
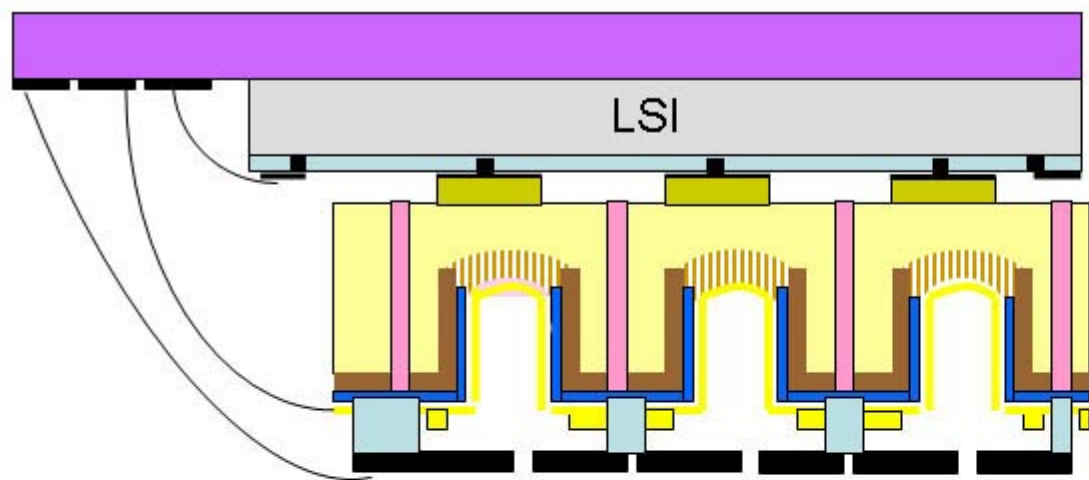
nc- Si を用いた1:1 プロジェクション露光システムによるレジストパターニング例



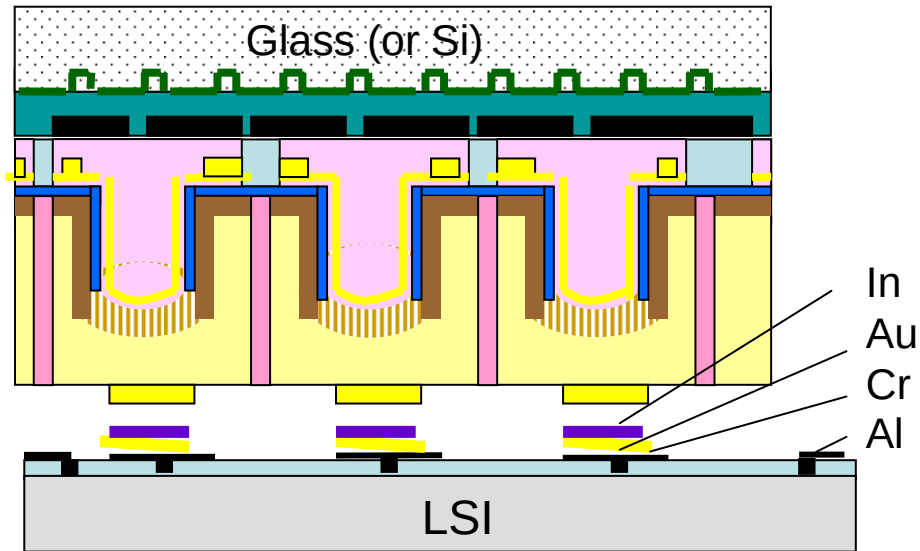
作製したナノクリスタル(nc)Si電子源



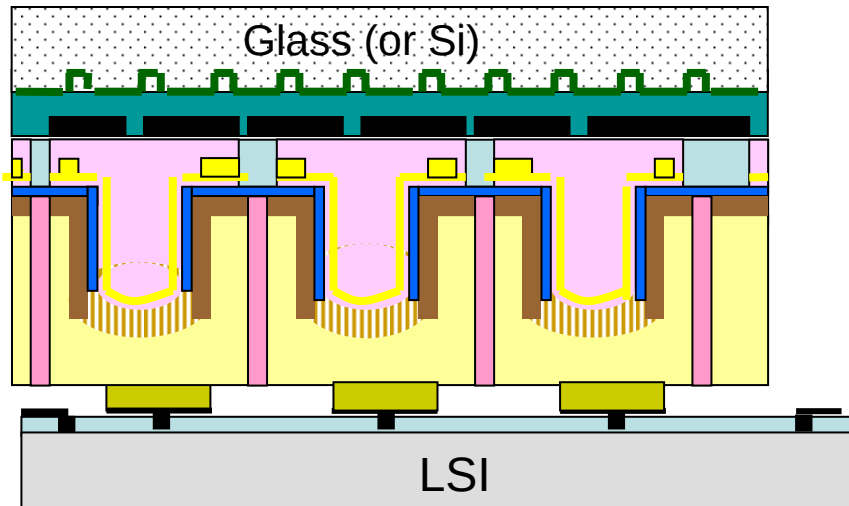
ナノクリスタル(nc)Si電子源駆動用LSI



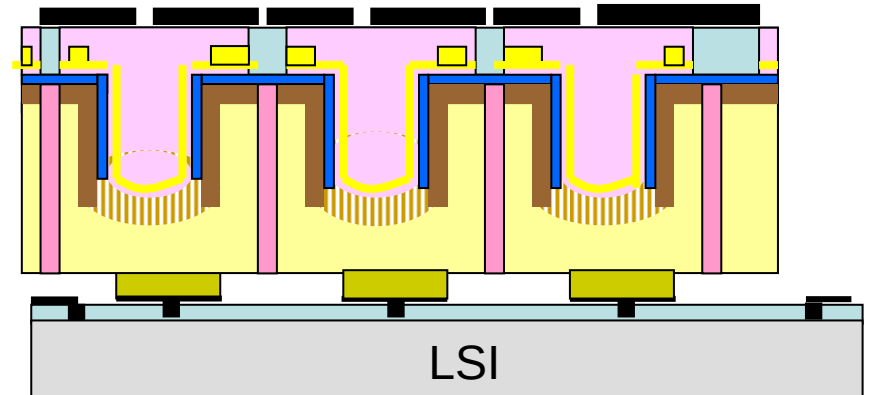
1) Alignment of electron source to LSI



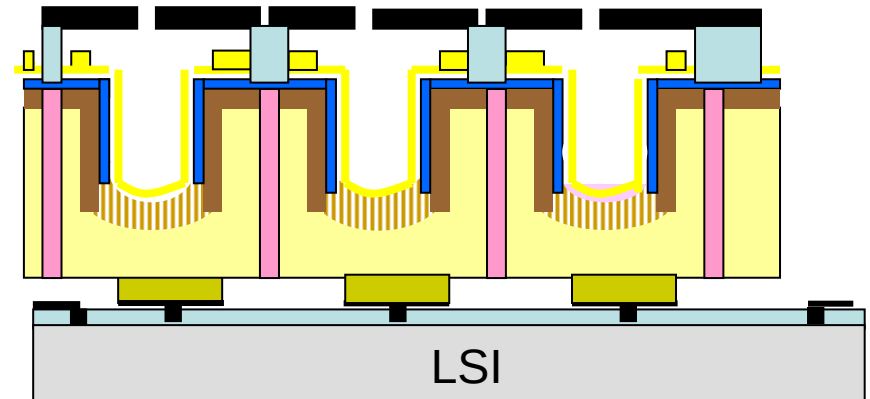
2) Au-In-Au TLP bonding (200°C~)



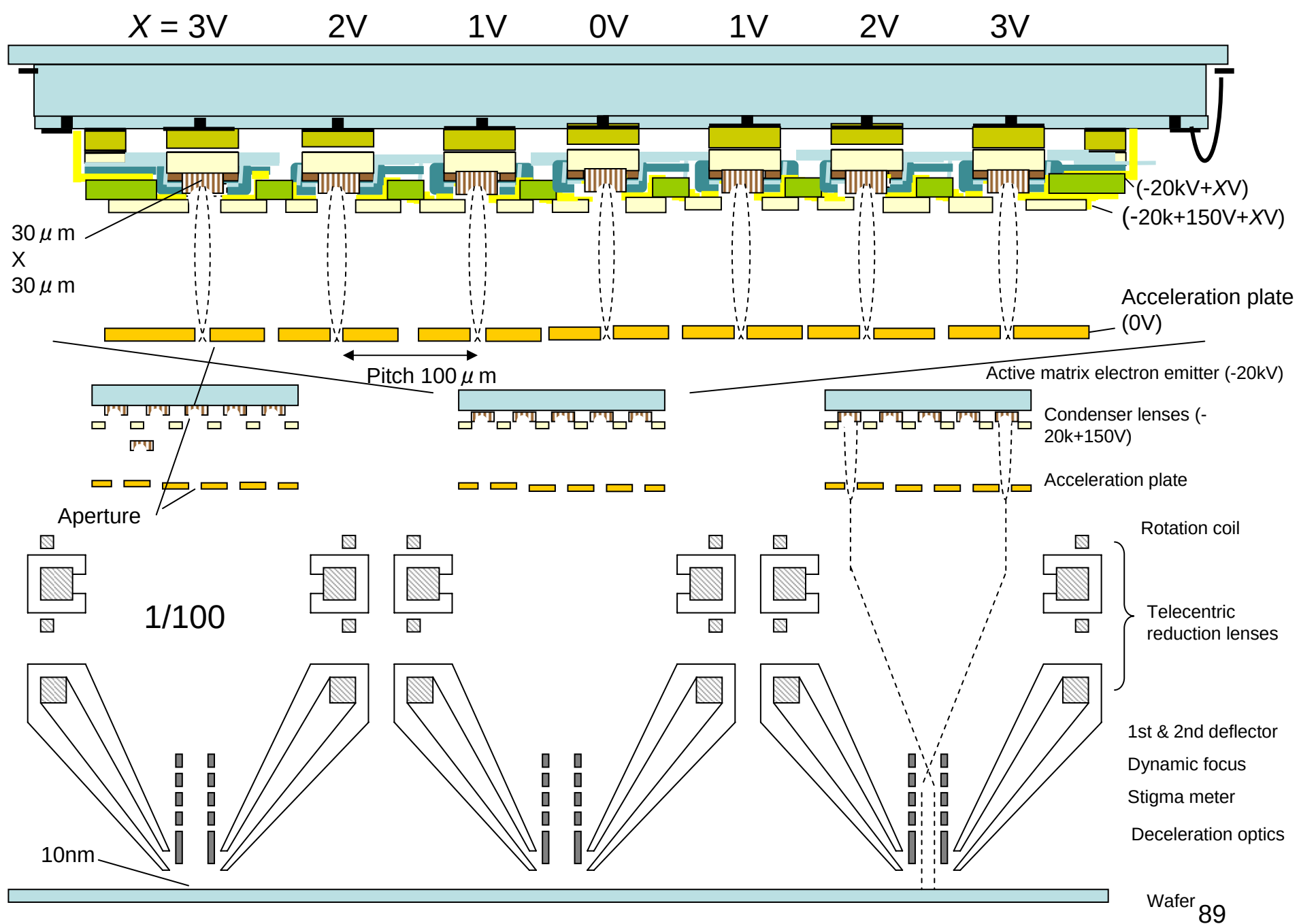
3) Ge etching (H_2O_2)



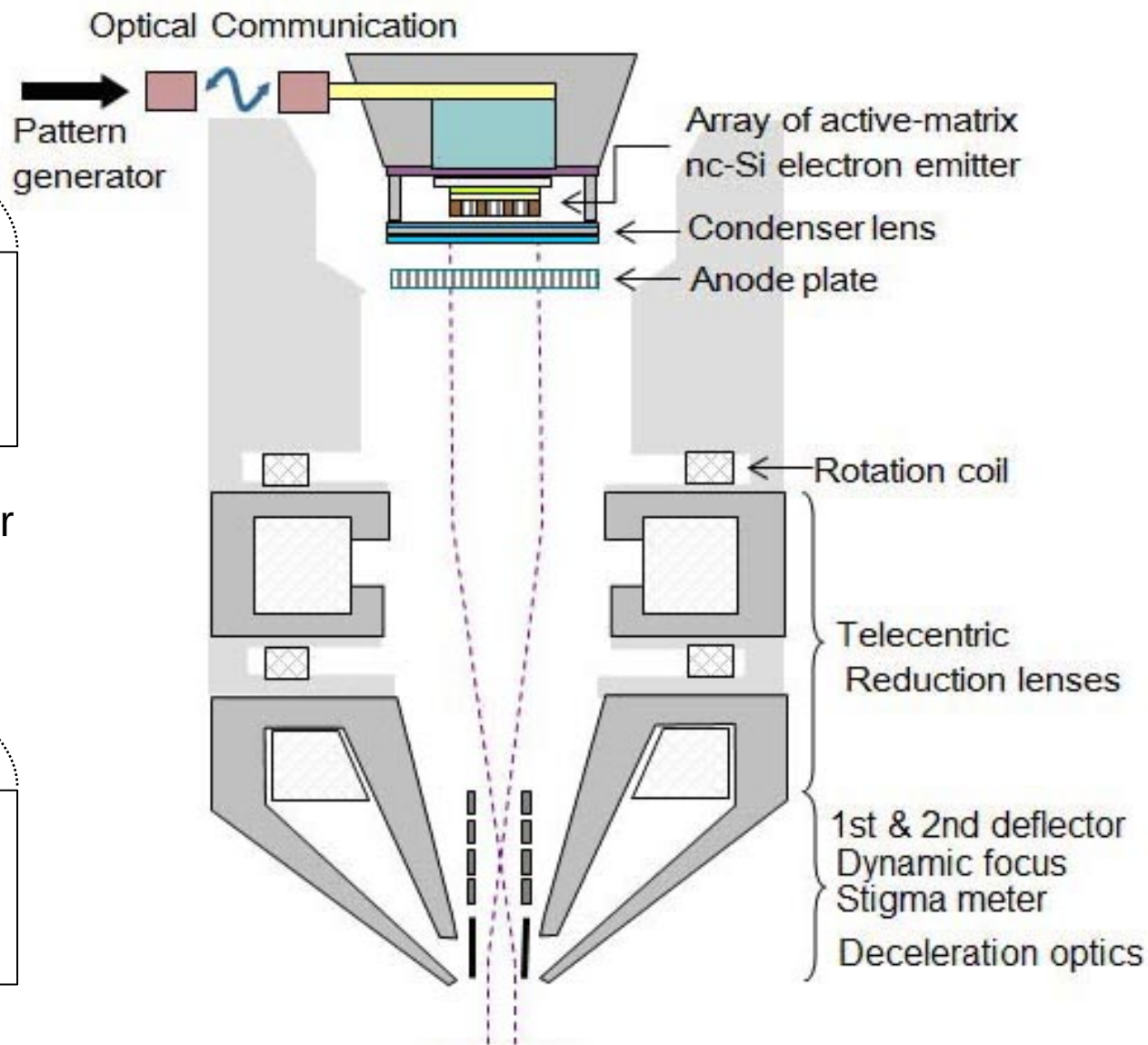
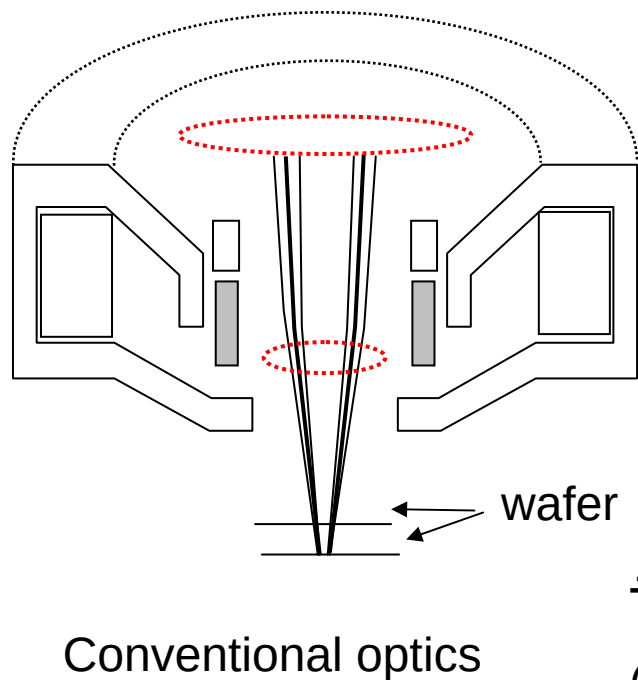
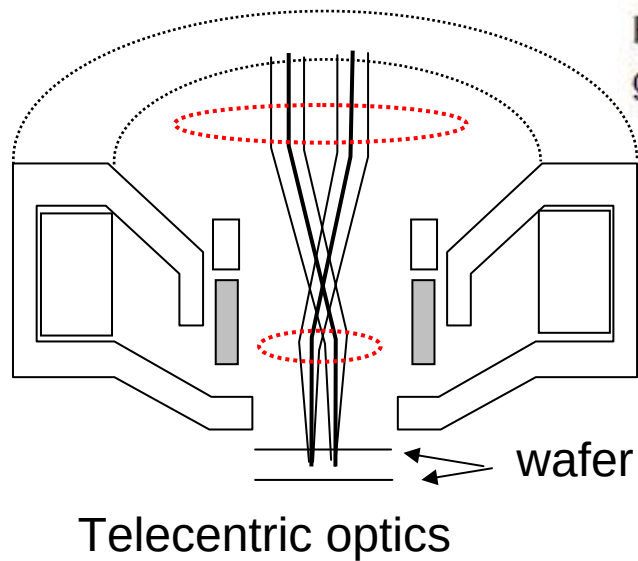
4) Polymer removal



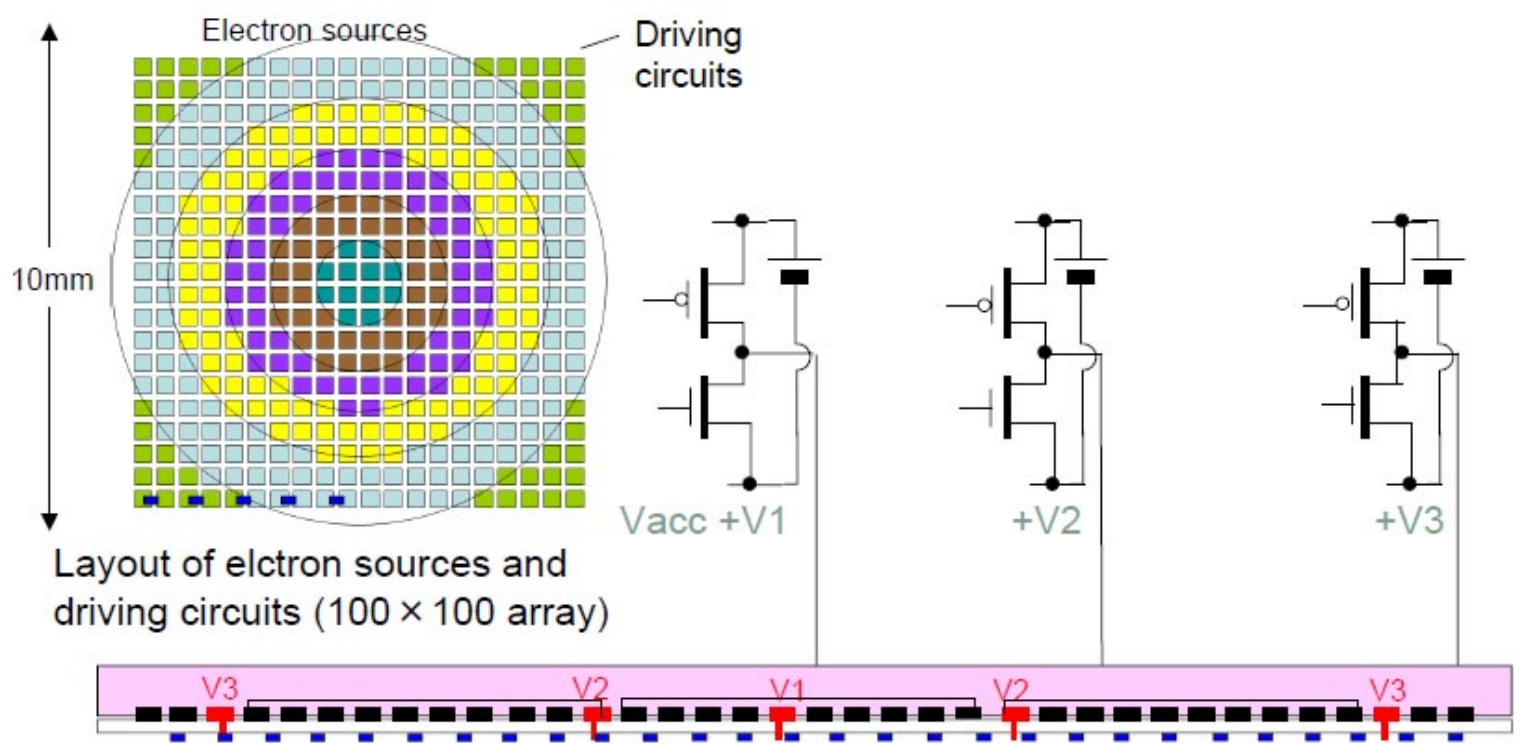
Electron source process



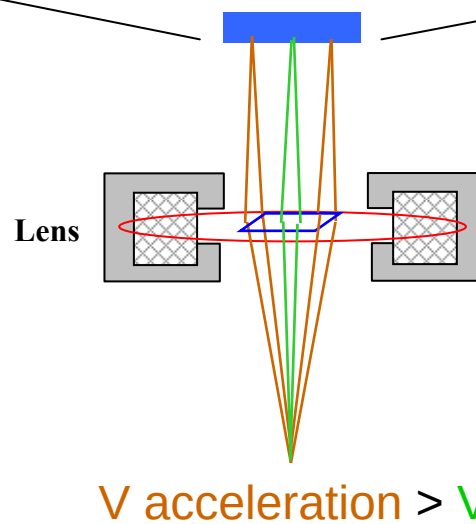
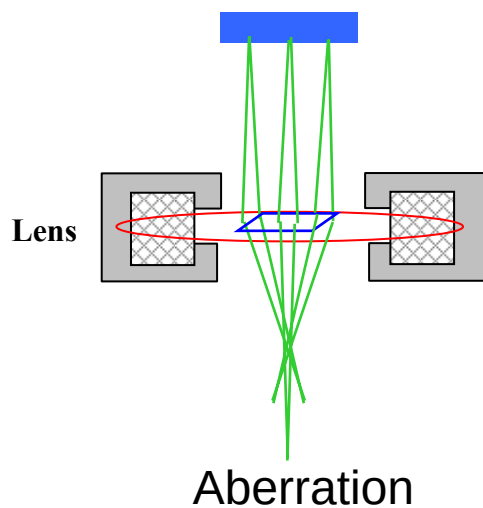
マイクロEB露光カラムアレイ



テレセントリック電子光学系によるマイクロEB露光カラム
(クレステック 小島)



Electron emitter array



電氣的収差補正



↓ 東北大学 青葉山キャンパス



マイクロナノマシニング研究教育センター
(2インチLSIライン)



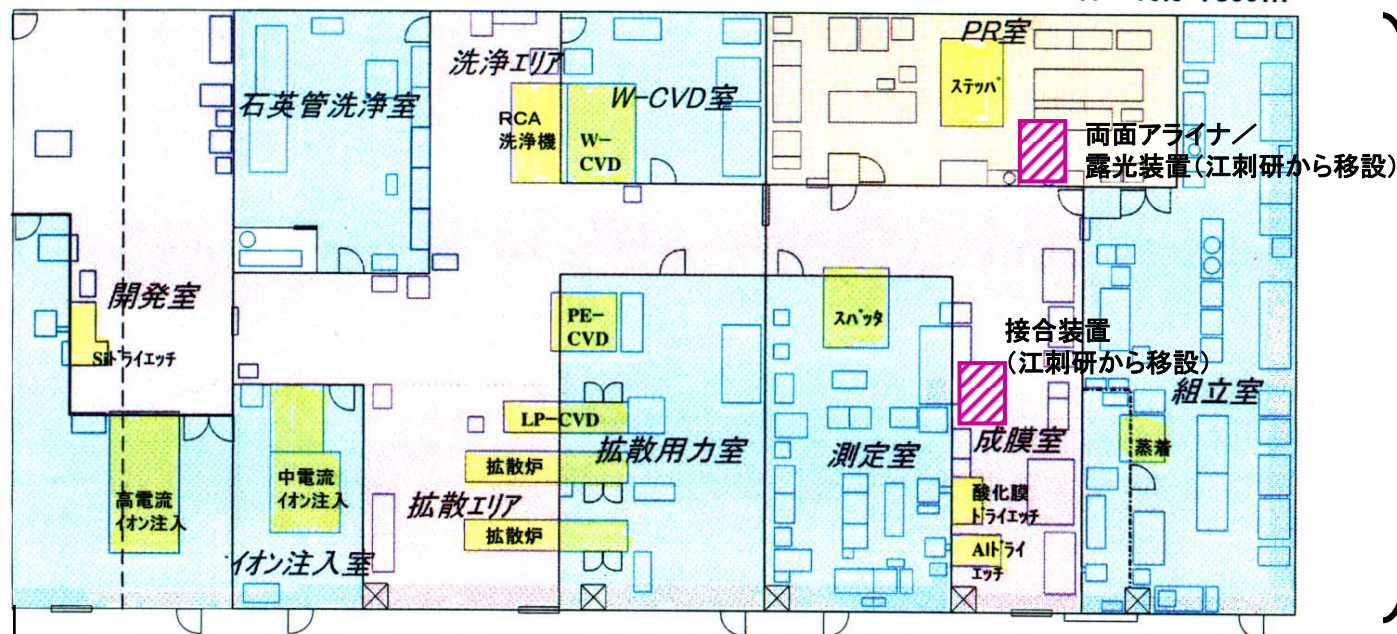
西澤記念研究センター (試作コインランドリー)
(4/6インチMEMSライン)
MEMS試作施設



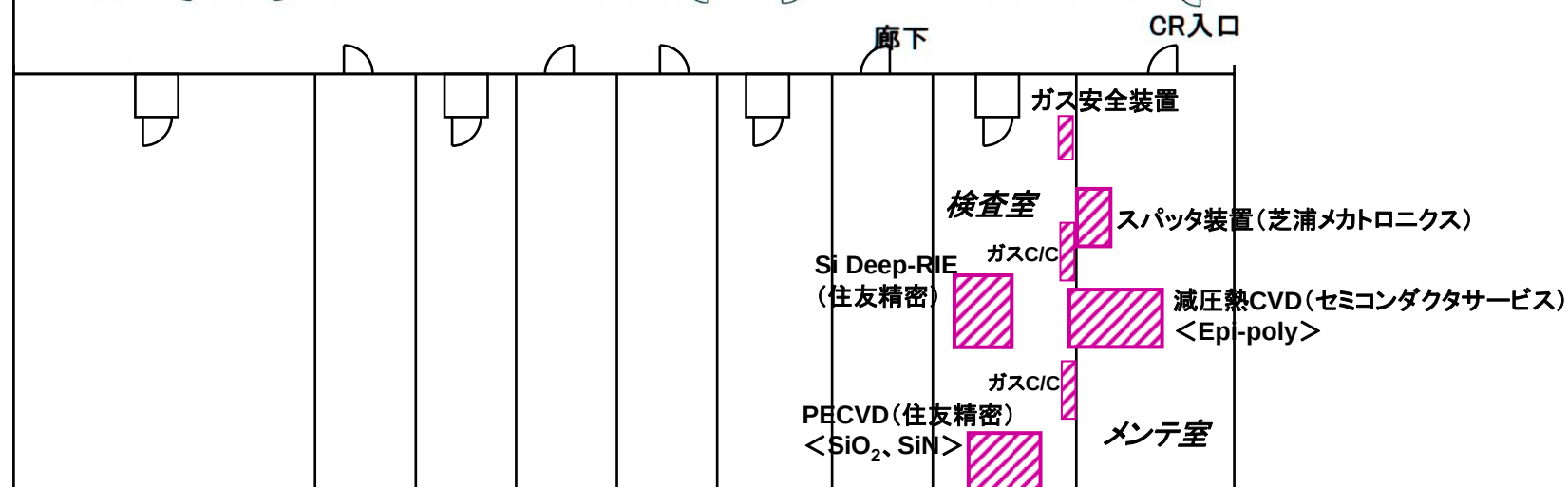
東北大学MEMS試作ライン
ヘテロ集積化初期試作
(20mm 角ライン)



産総研MEMSビジネス棟
ヘテロ集積化量産試作
(8/12インチライン)⁹²



これまでパワートランジスタの4インチ製造、組立ラインとして利用されてきた部分。



1,800 m²

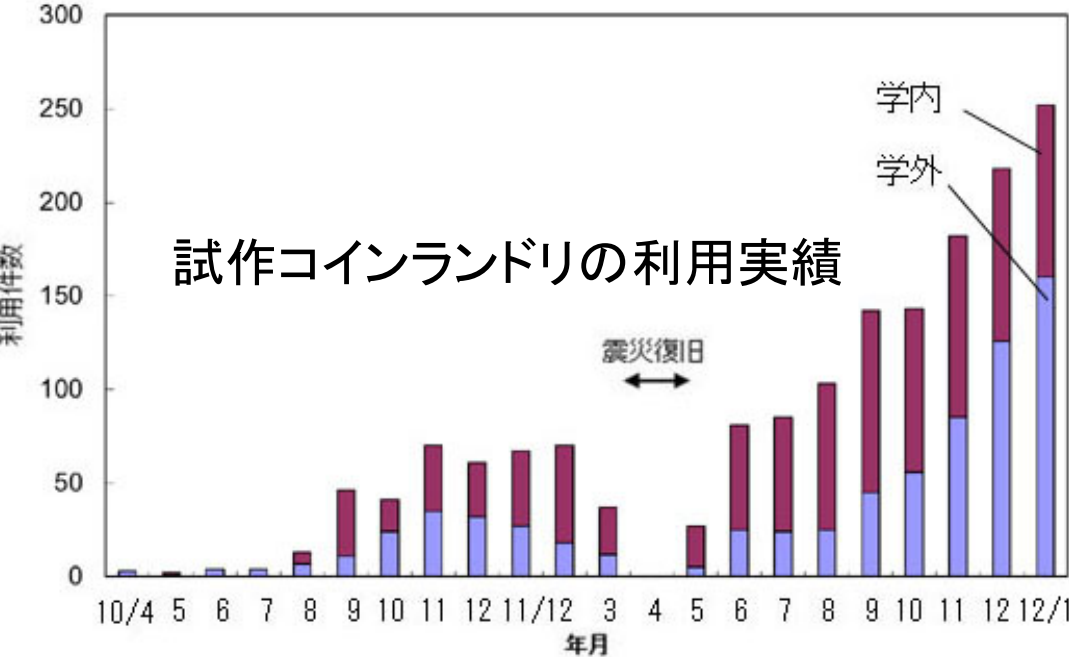
試作コインランドリのメインとなる2階クリーンルーム 93



会社が来て使う試作コインランドリ（仙台市青葉台）



自作中心の設備による試作実験室



→ 開発だけでなく直接の製品化ができるようにするための法整備への働きかけ



請負試作開発を行う(株)MEMSコア (仙台市泉パークタウン)

開発

製造

欠けている部分
(集積化MEMS)

↓
半導体ビジネス
の再生

欠けている部分
(多品種少量生産)

↓
ハイテクベンチャ
中小企業の競争力増大

大量に出るもの



メムス・コアなどによる受託
開発・少量生産が有効



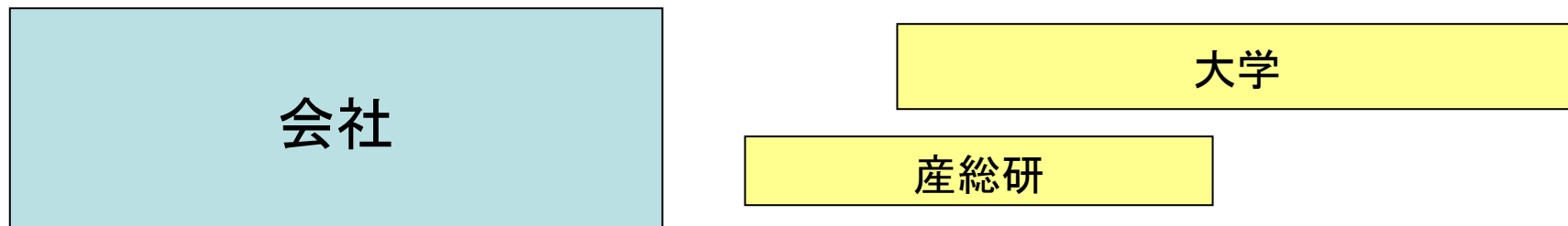
量が少ない

儲けがないもの

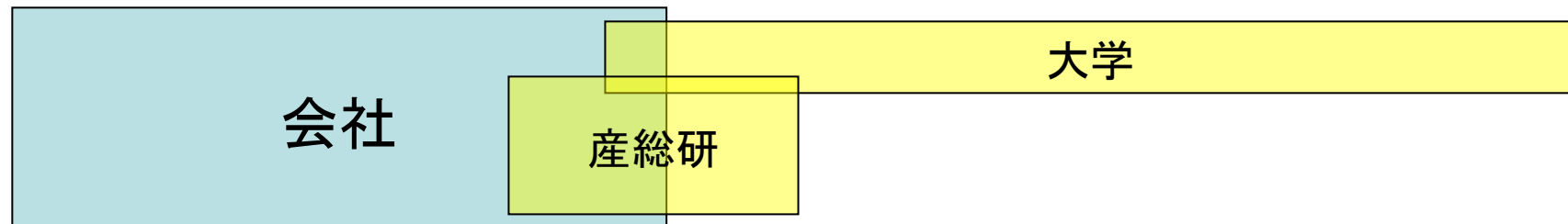
以前



現在



今後



<応用>

試作開発のための共用設備が必要

→産総研を活用

<基礎>

産業競争力の強化

(次世代産業の種を生み出す場で製品に結びつく研究開発を行う)

研究開発の効率化・低コスト化(オープンコラボレーション)

↑
大学に蓄積した豊富な知識の提供

MEMSセミナー

参加費、資料(印刷物、CD)代無料、参加申込不要
(手間最小、中身最大)

2006年 8/23-25	東京	参加者	280名
2007年 8/22-24	仙台	参加者	80名
2008年 8/20-22	福岡	参加者	150名
2009年 8/4-6	名古屋	参加者	100名
2010年 8/5-7	つくば	参加者	211名
2011年 8/9-11	京都	参加者	170名
2012年 8/22-24	東京 東大武田知ビル	予定	

↓
ハイテク多品種少量生産 → 産業競争力大、ハイテクベンチャ

↑
設備の共用・有効活用(ものづくりの場) 雇用創出

MEMS パークコンソーシアム (MEMSPC)主催 MEMSセミナー



IMEC（ベルギー）

2010.8 – 2011.2 田中秀治 准教授を派遣

→ 2011より東北大学はアジアの大学で始めてIMECの Strategic Partner
米国はスタンフォード大学、欧州はローザンヌ工科大学(EPFL)



ドイツ フ라운ホーファ研究機構と仙台市の交流協定調印式
2009年 延長式(仙台)、2011年 プロジェクトセンター発足



昨年のiCAN' 11

iCAN '11高校生部門
で国際大会出場は
写真の宮城工業高校
チームと宮城県仙台
第一高等学校チーム



第3回 国際ナノ・マイクロアプリケーションコンテスト(iCAN'12)

<http://www.rdceim.tohoku.ac.jp/iCAN12/>

【主催】仙台MEMSパークコンソーシアム、東北大学マイクロシステム融合研究開発センター

【概要】MEMSデバイスを用いたアプリケーションを提案し、試作した成果を競う国際コンテスト。
対象は高校生、高専生、専門学校生、大学生、大学院生のチーム。世界各国・地域で予選を行い、2012年7月5～8日 中国北京にて世界大会開催。

【スケジュール】

1次審査(書類審査) 2011年12月19日(月)(終了) 1次審査を通過した13校 (チーム数)

高校:福島県立郡山北工業高(1)、宮城県仙台第一高(2)、宮城県工業高(1)

高専:豊田工業高専(1)、一関工業高専(1)

大学:日本大学(1)、京都大学(1)、東北工業大学(1)、東北大学(4)

2次審査(試作、発表) 2011年12月～2012年4月 チーム毎で試作

2012年5月17日(木) 日本予選会開催(試作の成果を発表) 東北大学片平さくらホール

問合先:東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 戸津健太郎

Tel:022-229-4113 E-mail: totsu@mems.mech.tohoku.ac.jp



指文字翻訳機「TEMS(Talking Equipment from Manual Sign)」

加速度センサと磁気センサを組み合わせて手話で使われる指文字を認識し、音声に変換する装置。聴覚障害のため言葉を発することが不自由な方が、手話を知らない人に意思を伝える際の補助機器。

優勝賞金3000USDは、東北地方太平洋沖地震の被災者支援のために寄付

2011年6月6日に北京で開催されたiCAN' 11で優勝した京都大学チーム

大勢の人間の努力は
ひとりの天才に勝る

高柳健次郎

テレビの父



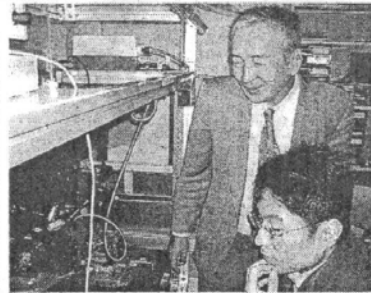
NHK番組
「プロジェクトX」

高柳健次郎が始めてTVを実現した、ニポ一板を用いた
半電子式テレビを高校生と再現実験

(早稲田塾との「スーパナノメカニクスプログラム」)

江刺研究室(東北大)評価1位

産学連携特別調査



江刺正喜教授の研究室はMEMS研究の草分け(東北大)

企業が期待や関心を抱く「21世紀COEプログラム」の研究テーマ

研究プログラム名	大学名	企業数
1 物質機能の科学的解明	東北大	28

刺教授)という姿勢が高い評価を受けた。江刺教授は微小電子機械システム(MEMS)研究の草分け。「最先端の技術を応用分野まで幅広く研究していることが企業にとって魅力的(大手電機メーカー)との声が多かった。MEMS技

企業

研究テーマ

日経産業新聞の「産学連携特別調査」は企業が高く評価している大学の研究室についても聞いた。有効回答五十一社のうち、最も多くの企業から支持を得たのは東北大学の江刺研究室(江刺正喜教授)だった。このほか大阪大学の川合研究室(川合知二教授)、立命館大学の杉山研究室(杉山進教授)など産学連携の実績がある研究室が名を連ねた。同調査は大学と企業の連携が予想以上に進んでいることも浮き彫りにした。(一面参照)

江刺研究室はソニーやキヤノンなど大手企業からの派遣研究員を積極的に受け入れている。「大学の研究成果を確実に企業の現場で活用できるようにして、ビジネスに結び付けてもらう(江刺教授)」という姿勢が高い評価を受けた。

江刺教授は微小電子機械システム(MEMS)研究の草分け。「最先端の技術を応用分野まで幅広く研究していることが企業にとって魅力的(大手電機メーカー)との声が多かった。MEMS技

術は小型燃料電池やDNA(デオキシリボ核酸)チップ、光通信用スイッチなど応用範囲が広いだけに、幅広い業種の企業から「頼れる存在」になり技術者を融合したナ

二位は阪大の川合塾(産業科学ナノテクニ

二位数は阪大の川合塾(産業科学ナノテクニ

理科少年シリーズ……0

東北大学・江刺研究室最強の秘密

esashi masayoshi
江刺正喜

著者

本間孝治
出川通

検証 東北大学・江刺研究室最強の秘密

なぜ江刺研究室は、世界中の企業から支持されるのか?

最先端技術MEMSの世界的権威が語る
人材育成、近代技術史と先端技術、勝つ戦略
キーワードは「理科少年」

彩流社

江刺正喜

著者
本間孝治
出川通

彩流社

- 第1章 江刺正喜教授の「理科少年」時代
- 第2章 江刺研究室の「強さ」
- 第3章 近代技術史と先端技術MEMS
- 第4章 MEMSビジネス

- 1 農業に伸びているビジネス
- 2 大型研究施設について
- 3 人材育成には時間がかかる
- 4 再びMEMSの特性と日本のシステムについて……結論



ISBN978-4-7791-1049-8

C0334 ¥1600E

彩流社

定価(本体1600円+税)





教授

准教授

教授

准教授

助教

小野 崇人

田中 秀治

芳賀 洋一

戸津 健太郎

吉田 慎哉

(ナノマシニング) (RF、耐環境)

(医用)

(コインランドリ)

(有機記録材料)



助教

助教

助教

客員教授

助教

室山 真徳

宮下 英俊

川合 祐輔

T. Gessner

林 育菁

(集積回路設計) (電子線描画)

(圧電)

(パッケージング)

(MEMS材料)

主な共同研究者

ドイツブラウンホーファ研究所¹⁰⁴