

「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」／次世代人工知能技術分野(先導研究)
＜研究開発項目⑦＞次世代人工知能技術の社会実装に関するグローバル研究開発

空間移動時の AI融合高精度物体認識システムの研究開発

AIRs: AI-enabled Innovative Recognition System for spatial mobile Robots



2018.3.16

国立大学法人東京大学 下山 勲

【想定するアプリ】
工場搬送ロボット
パーソナルモビリティ
家庭アシスタントロボット
セキュリティロボット
自動運転自動車
ドローン



可視カメラ

赤外カメラ



【認識すべき対象】

ガラス窓・ドア、縁石、段差、切り下げ、車止め、カラーコーン、石、落下物、歩行者、車、人形・写真・絵、等

【空間移動時の物体認識の課題と解決案】

実環境で、何がどこにあるか、認識の向上が課題

AI → 革新センサ情報のAI融合

→ 多波長同一光軸イメージャ(対応点が同一ピクセル)

イメージャ → 材質・温度に依存するスペクトルの利用(夜間、ガラス)

→ 赤外線利用距離計測

ジャイロ → 画像各点の3次元座標情報(視線方向、距離情報利用)

→ 実環境での精密な視線方向情報

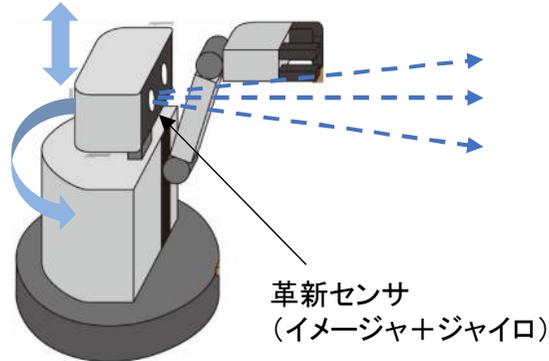
(ロボット筐体の変形、不整地移動時の振動、パン・チルト)



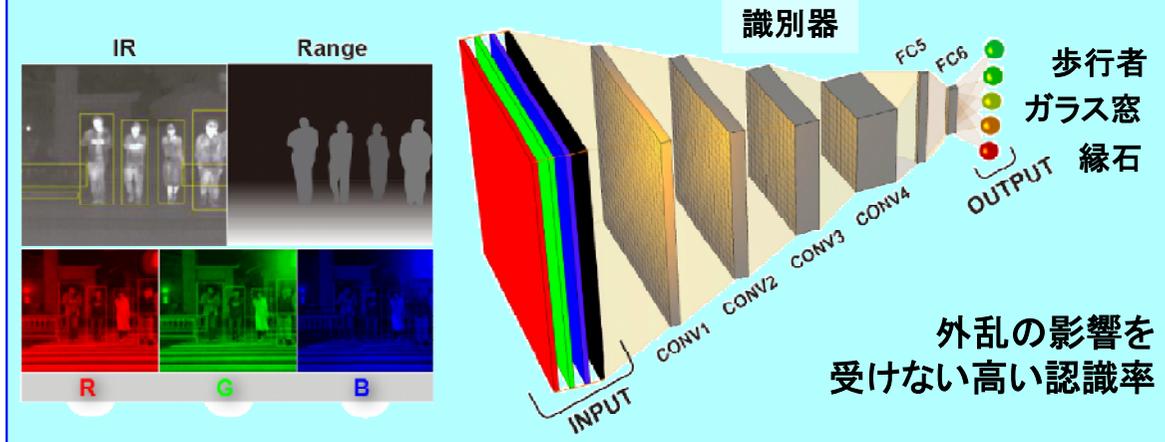
可視カメラ 赤外カメラ



同軸多波長画像情報 カメラ姿勢情報



革新センサ情報に基づいた次世代人工知能



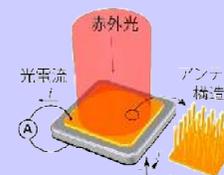
人工知能による物体認識

五感を超えた革新センサからの入力情報を活用する人工知能により、**正確・堅牢・高速な物体認識システム**を実現

- ① 可視から中赤外までの多波長画像により人などの発熱物、ガラスなどの透明物を認識
- ② 高精度分子慣性ジャイロで視線方向・画素の絶対座標をリアルタイムにズレなく計測認識。
- ③ 視線を変える能動的な認識(覗き込み)により認識能力がさらに向上

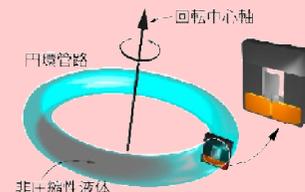
革新センサ

プラズモニック ワイドバンドイメージャ



- ・Si基板上で、可視光から中赤外まで同一光軸の画像
- 多波長画像間ズレなし

高精度 分子慣性ジャイロ



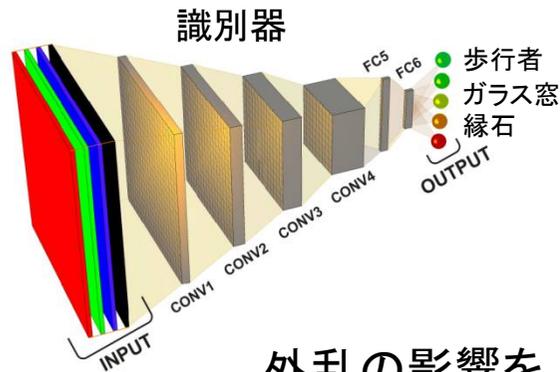
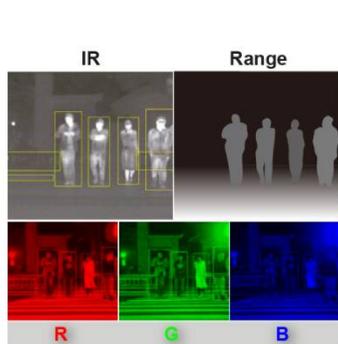
- ・3軸広帯域
- ・高感度かつ加速度の影響なし

新エネルギー・産業技術総合研究開発機構

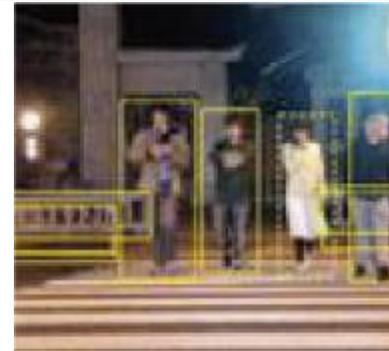


研究開発責任者
東京大学教授
下山 勲

	H29年度	H30年度
プラズモニック ワイドバンドイメージャ	Si中赤外デバイス要素技術開発	
	Si中赤外デバイスイメージャ化・ワイドバンド化要素開発	
革新センサ情報に 基づいた次世代人工知能	一次画像データセット	二次画像データセット
	物体認識基礎検討	物体認識アルゴリズム開発
高精度分子慣性ジャイロ	高精度信号処理技術	多軸高精度信号処理技術
	高精度分子慣性ジャイロ実験モデル検討、小型化開発	
		画像データセット拡張
		インテグレーション



外乱の影響を
受けない高い認識率



可視画像



赤外画像

ナイトビジョンとして利用可能
信号など発光体のハレーションなし

物体認識アルゴリズムの特徴

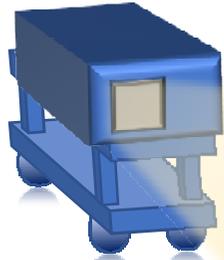
可視から中赤外までの**多波長画像**を利用

- ⇒ 夜間でも高精度に歩行者を認識
- ⇒ ガラスなどの透明物も物性を利用して認識

高精度**ジャイロ**から計算されたカメラの姿勢角を利用

- ⇒ ロボットの動きによりカメラが振動しても認識

高精度かつロバストな
物体認識



特殊カメラ

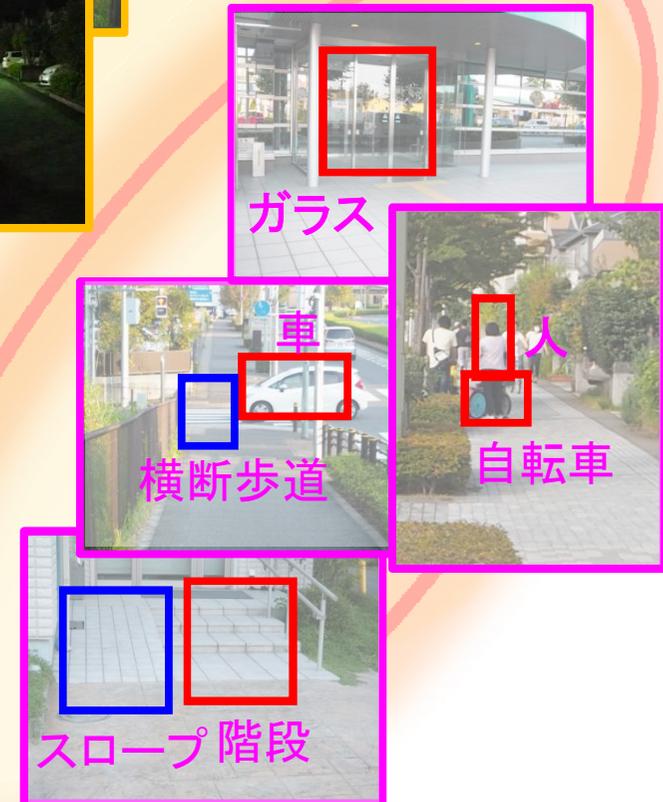
多様なシーンバリエーションで撮影

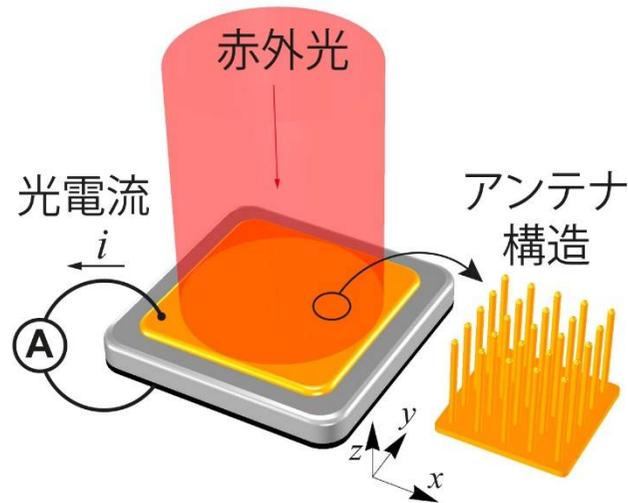


重要被写体
ラベル付け

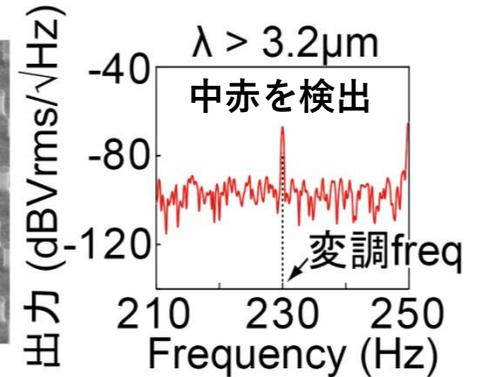
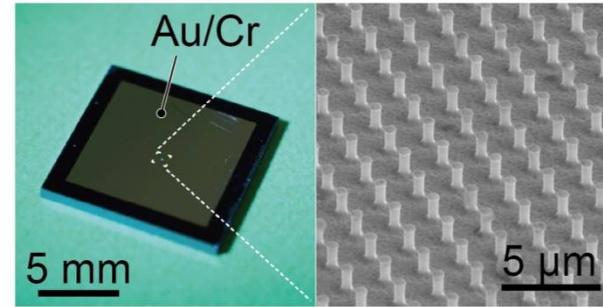


可視光・赤外光を同じ位置で記録





試作したSi中赤外検出素子

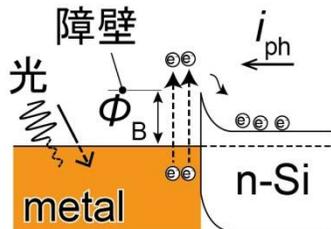
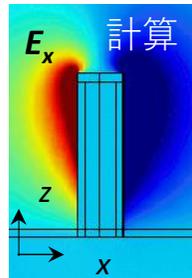


当グループは、Siで近赤外～中赤外光を効率よく検出できる独自技術を有している



この技術をさらに伸ばし、AI用認識データ取得のための多波長イメージャ(プラズモニックワイドバンドイメージャ)の研究開発

アンテナ構造で効率的な光吸収
表面プラズモン共鳴(金属表面電子の共振)が光を吸収
(右図: アンテナにおける共鳴)



吸収した光エネルギーをアンテナ内部の界面(ショットキー障壁)で電流に変換

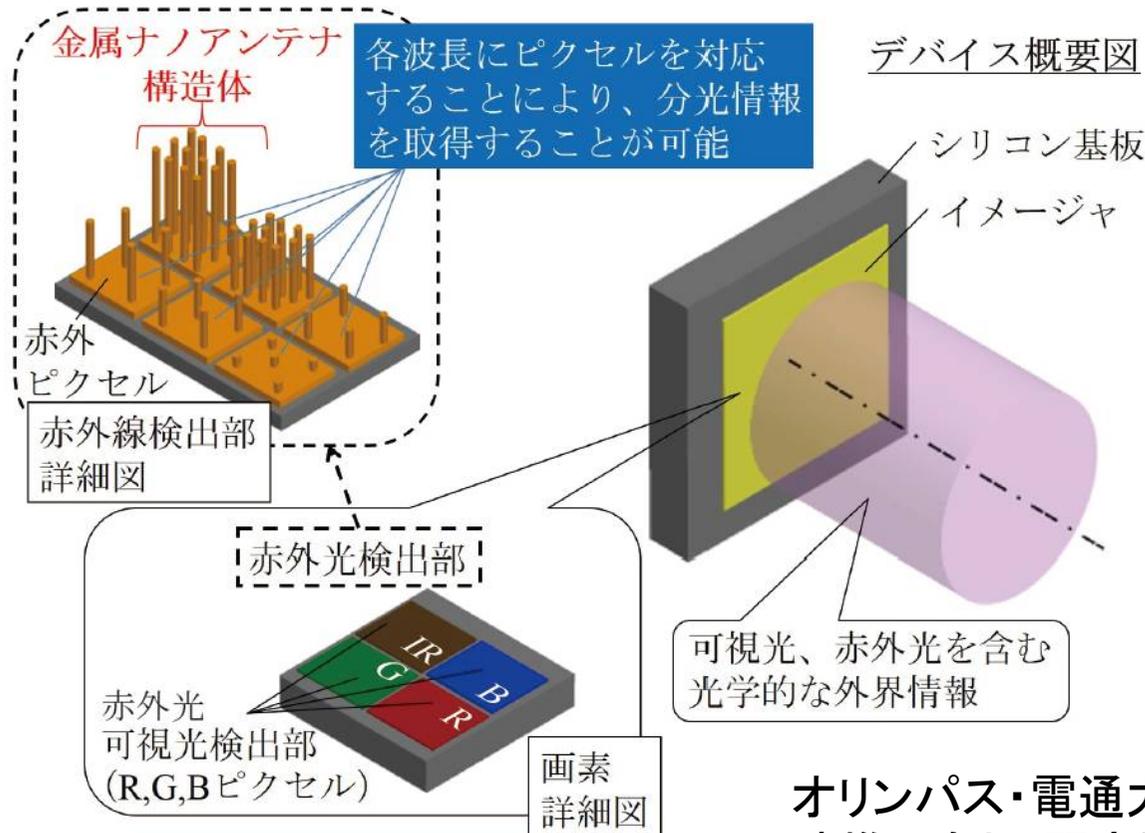
検出条件 $h\nu > \Phi_B$

Siで赤外線検出器

具体的研究課題

- ① チップ化のために検出回路との統合
- ② 全体システムのワンチップ化の検討
- ③ 距離計測アプリケーションへの適用検証

イメージャ
想定図



赤外光検出素子の
イメージャ化
への展開には

- ・読み出し回路
- ・画素選択回路

以上の機能要素
との融合が必要
不可欠

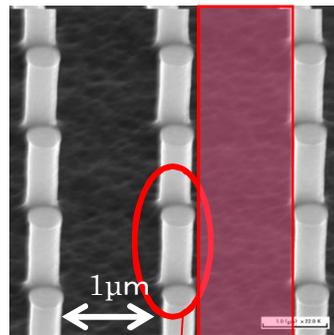
オリンパス・電通大・AIST・MMCの
連携のもと、研究開発

具体的研究課題

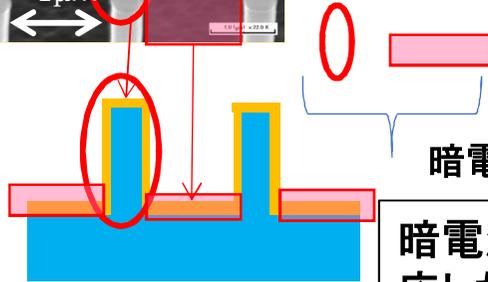
- ① 光検出器のモデルを作成し、読み出し回路、及び、画素選択回路を研究開発する
- ② 将来的な読み出し回路チップと光検出チップとの統合を見据え、接合技術の研究開発を進める

Si中赤外素子受光性能高性能化

○暗電流の低減



暗電流発生部位特定
発生量を見積もり
構造、加工条件を改善
現状 約1mA/□を
1/10に低減



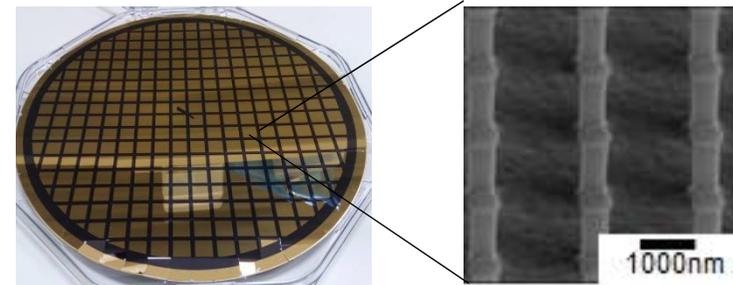
暗電流発生部位例

暗電流活性中心に対
応した、パッシベー
ション構造を検討

○感度向上

電通大と共同でナノポール・メタル構造等を見直す

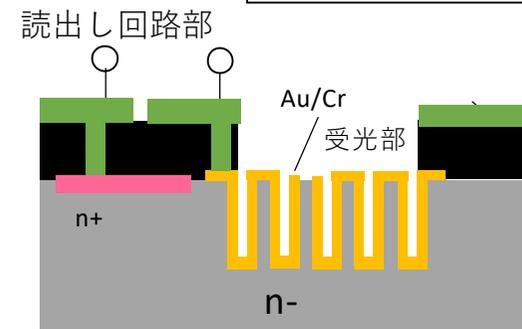
Si中赤外光検出イメージャ化検討



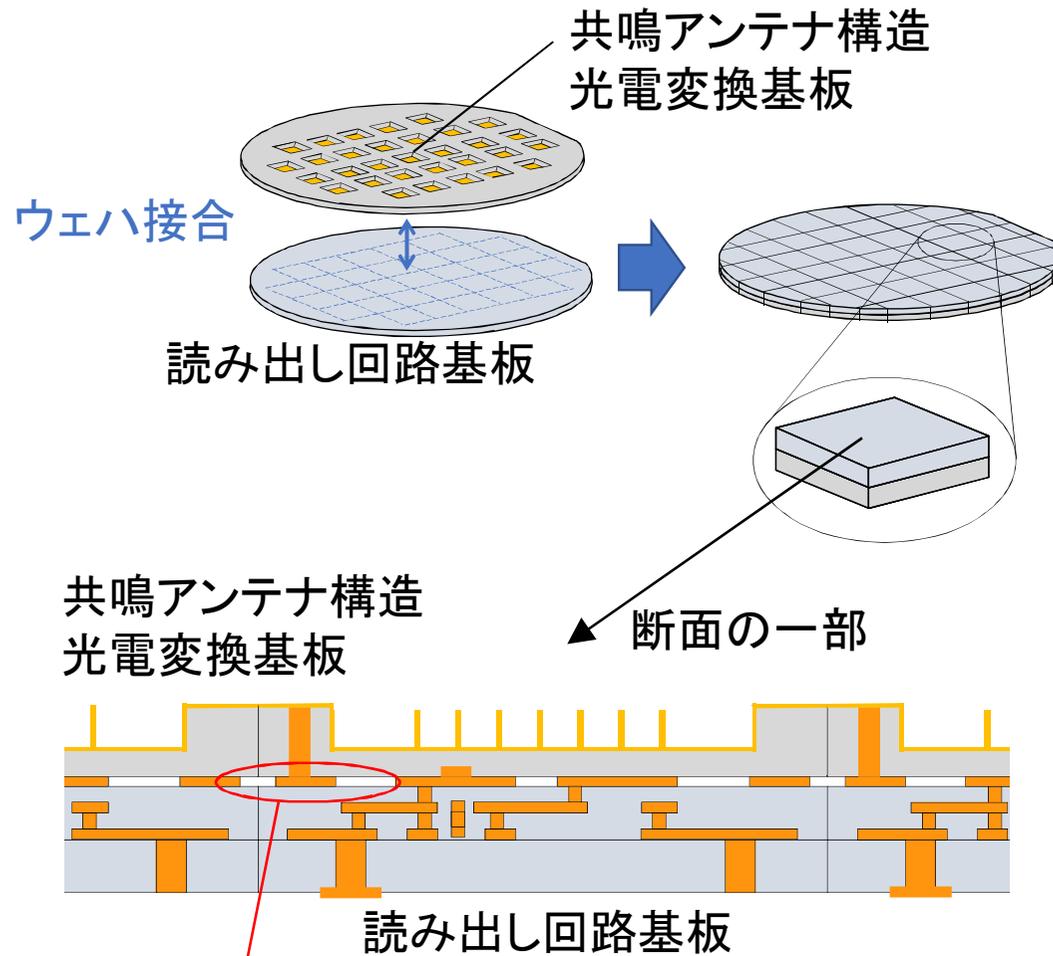
ナノアンテナ構造体形成8インチウエハ試作例

○イメージャ化構造検討

読出し回路部へ接続するための
配線電極構造等を検討

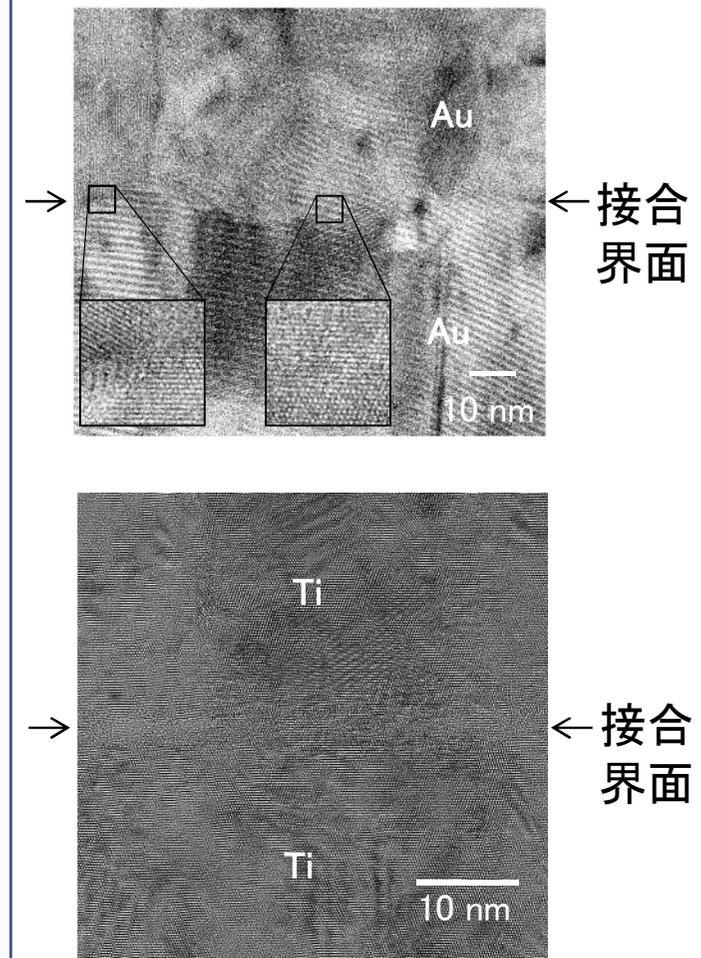


配線構造検討例



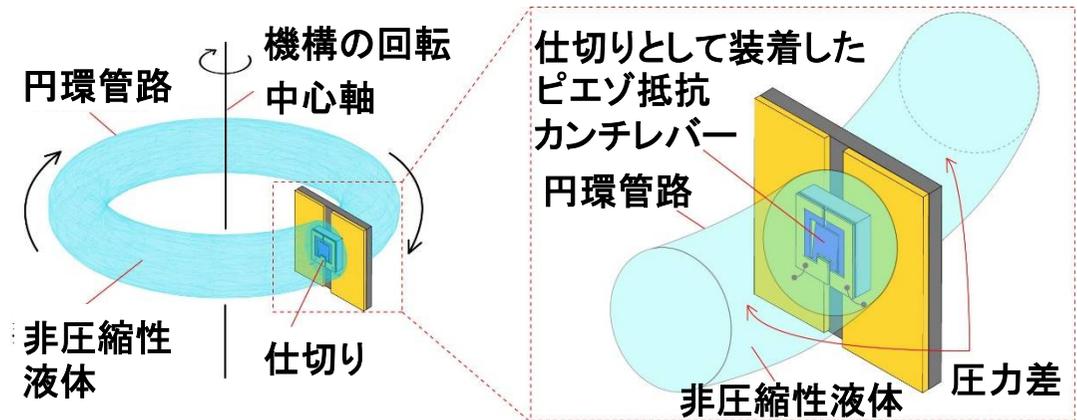
ショットキー特性を劣化させない、読み出し回路
へダメージを与えない、低抵抗接続を実現する
接合技術の研究開発

低温接合の一例(断面TEM像)



高精度分子慣性ジャイロの特徴

- 機構回転時、仕切りは静止した非圧縮性液体が持つ慣性力を受ける。この力から、角加速度、角速度を求める
- 可動要素のない構造であるため、振動・(他軸)加速度の影響を受けない
- 仕切りに高感度な力センサを用いること、また流路長を延長するような構造により高感度化が可

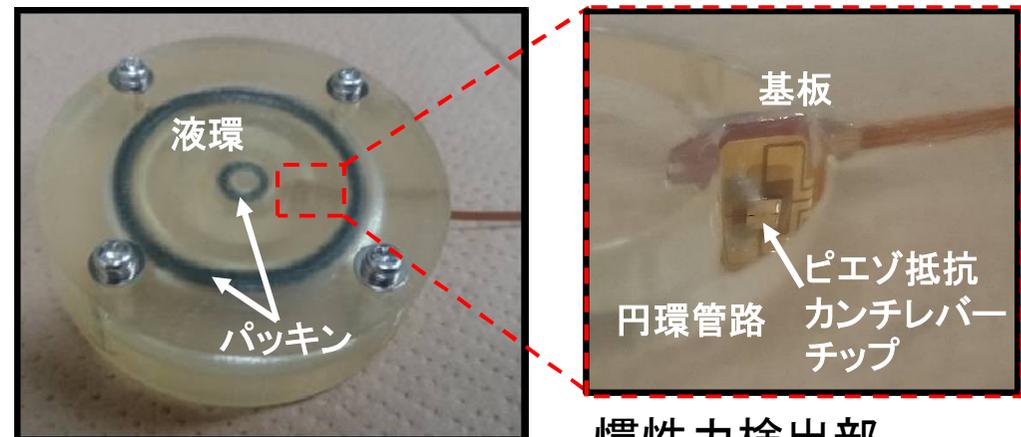


本研究の目標

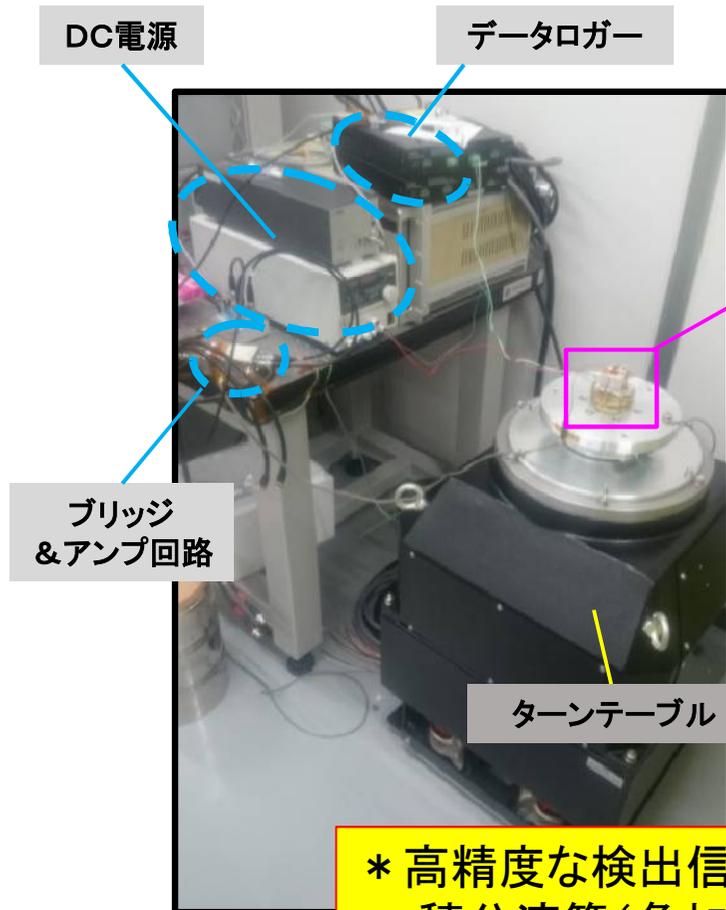
スパイラル流路構造により、小型かつ高感度なジャイロを実現

3軸角速度が検出可能な高精度ジャイロを実現

試作した1軸高精度分子慣性ジャイロ
ラージスケールモデル



慣性力検出部
拡大図



DC電源

データロガー

分子慣性ジャイロ
(LSモデル)

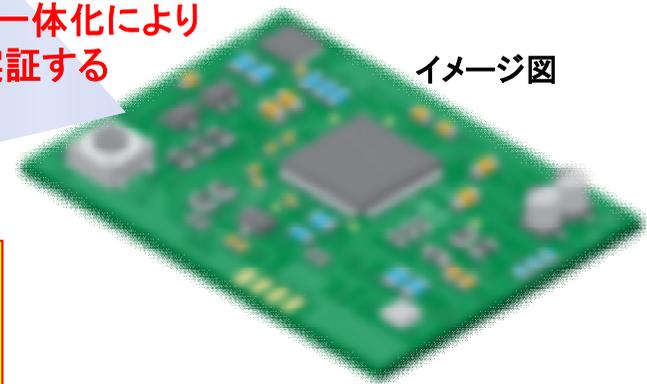
ブリッジ
& アンプ回路

ターンテーブル

LSモデル、ブリッジ&アンプ回路
およびデータロガーの一体化

検出信号処理の高度化と一体化により
高精度ジャイロセンサを実証する

イメージ図



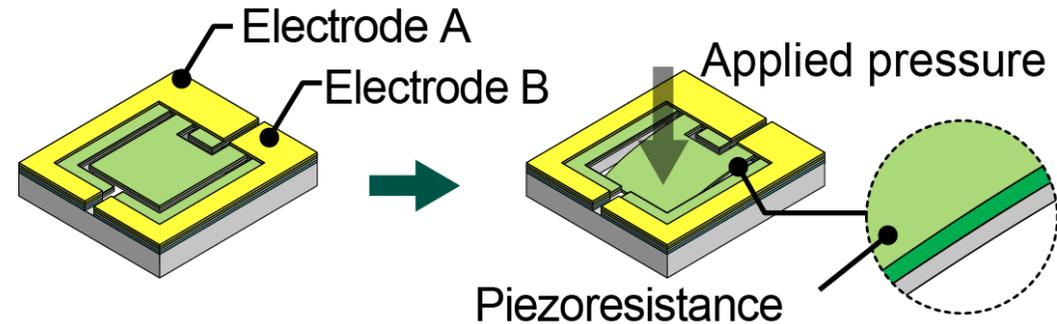
- * 高精度な検出信号処理
積分演算(角加速度→角速度)含めた
低ノイズ信号処理回路を開発
- * 多軸信号処理
相関分析を用いた高精度回路を開発

カンチレバー型差圧センサの特徴

- カンチレバー上面と下面の圧力差により、表面のピエゾ抵抗の抵抗値が変化
- 機械的に変形しやすいため、高感度に圧力差を計測可能

A-B Resistance : R

$$R = \Delta R + R_0$$

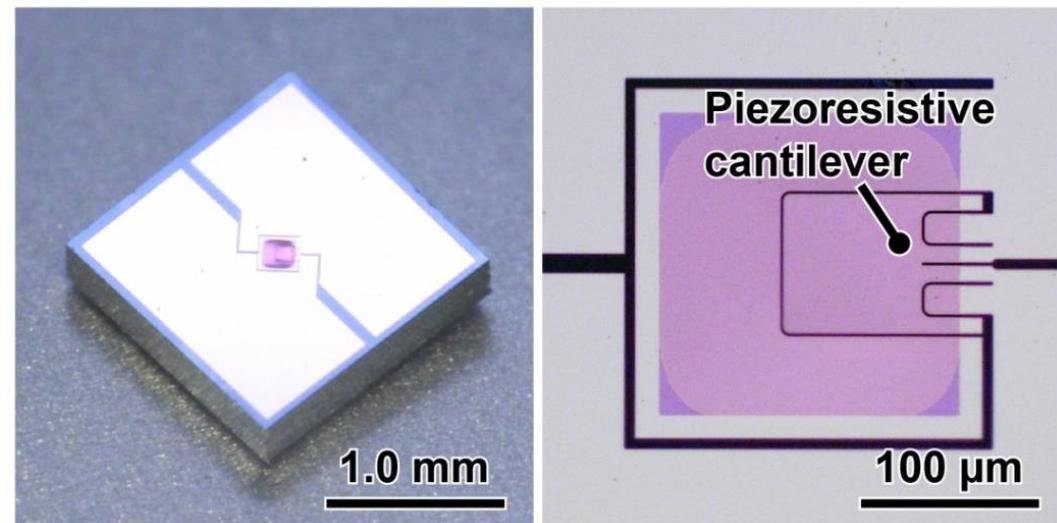


試作したピエゾ抵抗型カンチレバー

本研究の目標

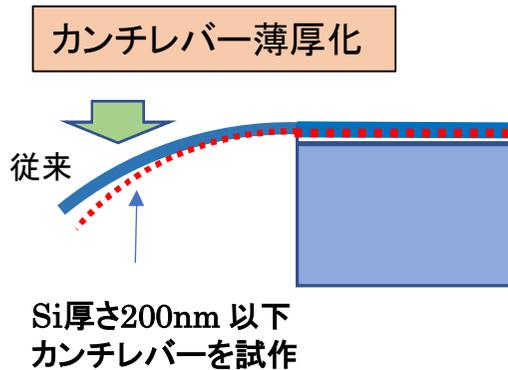
カンチレバーの薄型化、
形状の最適化により
従来の10倍の感度を実現

高感度化することで
より高性能なジャイロ素子を実現

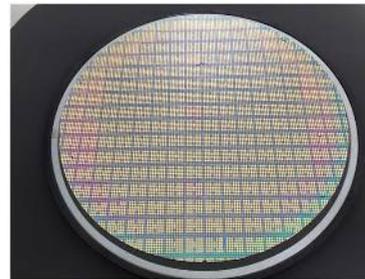


カンチレバーセンサ高性能化、実証用素子試作提供を担当

○カンチレバーの高感度化



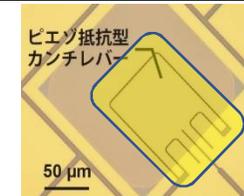
○カンチレバー形状歩留り向上



8インチ基板カンチレバー試作加工例
(1.5mm□カンチレバーchip
1300個以上配置)

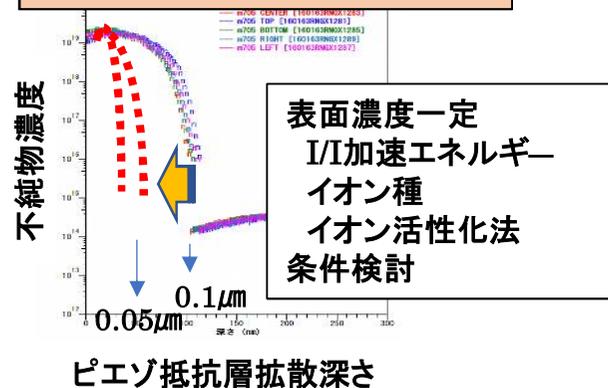
○低ノイズ化構造検討

ノイズ発生部にパッシベーション構造を導入

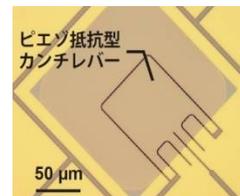


ノイズ発生源
特定改善

○ピエゾ抵抗層拡散深さ浅化



○カンチレバー工程中破壊を防止



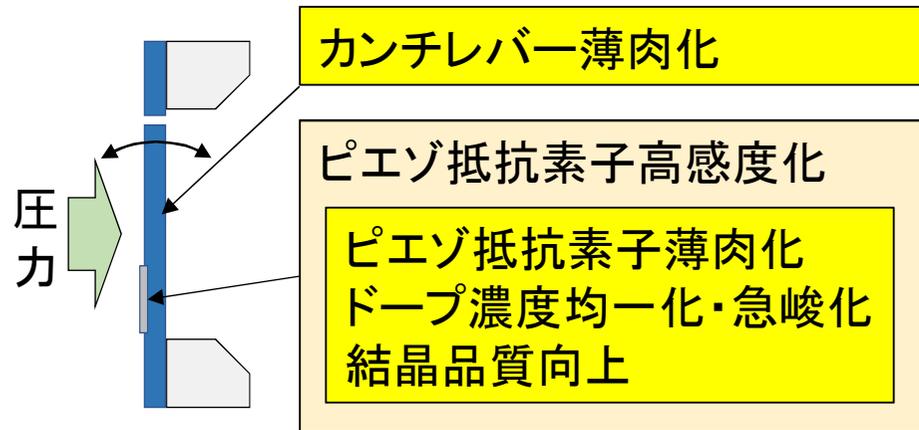
薄いSi構造の破壊防止
応力、歪集中を改善

現状カンチレバー平面形状

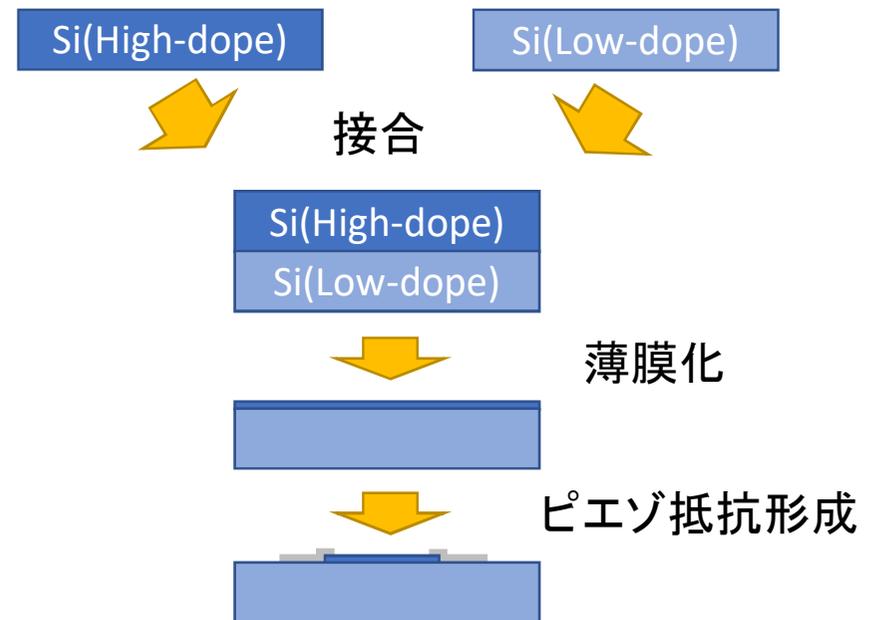
○流路一体化構造検討

流路設計とマッチングするセンサ構造を検討

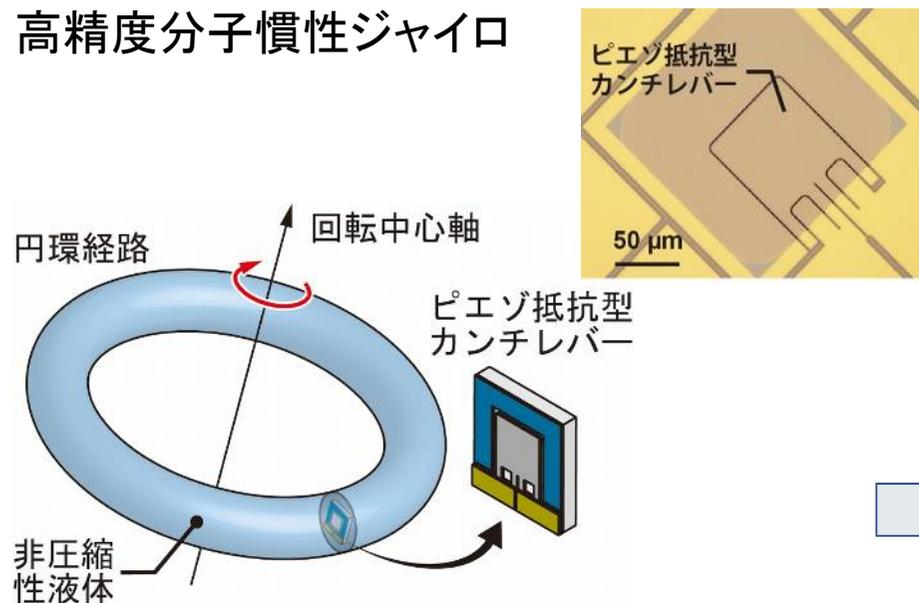
○カンチレバー型センサの高感度化



接合・転写による超薄膜形成



高精度分子慣性ジャイロ



石英ウェハ上に転写されたGaAs薄膜

可視+赤外利用アルゴリズム研究動向

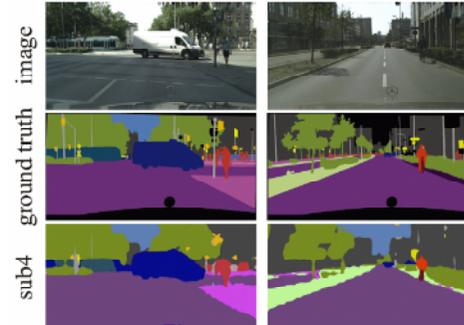


・KAISTの可視+遠赤外画像による歩行者認識データセットと比較し、セグメンテーションまでを含む課題を設定

“Multispectral Pedestrian Detection: Benchmark Dataset and Baseline,” CVPR2015

	本研究	KAIST 2015
認識対象	歩行者 + 障害物	歩行者のみ
課題設定	セグメンテーション	物体検出
物体検出率	日中 80% 夜間 70%	日中 65% 夜間 65%
学習データ	2万5千枚	5万枚
アルゴリズム	深層学習 ICNet ← 赤外画像	ACF (aggregated channel features)

可視画像の領域推定技術の性能比較

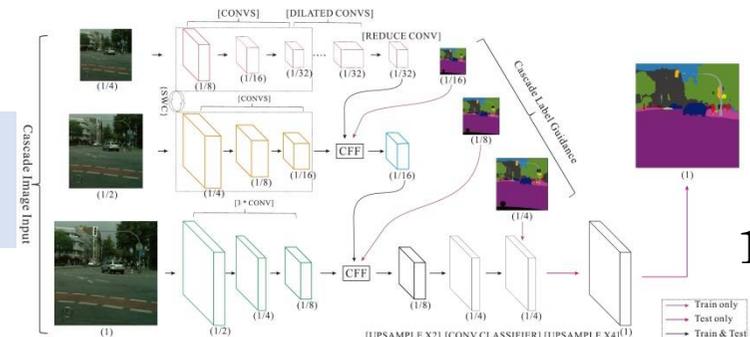


・自律移動ロボットの物体認識システムに必要な領域推定の研究を比較すると、ICNetは精度・処理時間ともに良好

Method	Sub	mIoU (%)	Time (ms)	Frame (fps)
SegNet [1]	4	57.0	60	16.7
ENet [21]	2	58.3	13	76.9
SQ [28]	no	59.8	60	16.7
CRF-RNN [34]	2	62.5	700	1.4
DeepLab [2]	2	63.1	400	0.25
FCN-8S [19]	no	65.3	500	2
Adelaide [15]	no	66.4	35000	0.03
Dilation10 [32]	no	67.1	4000	0.25
ICNet	no	69.5	33	30.3

“ICNet for Real-Time Semantic Segmentation on High-Resolution Images,” arXiv:1704.08545v1

可視+赤外利用アルゴリズムとして、
ICNetの特徴量の次元をR,G,BからR,G,B,IRに拡張



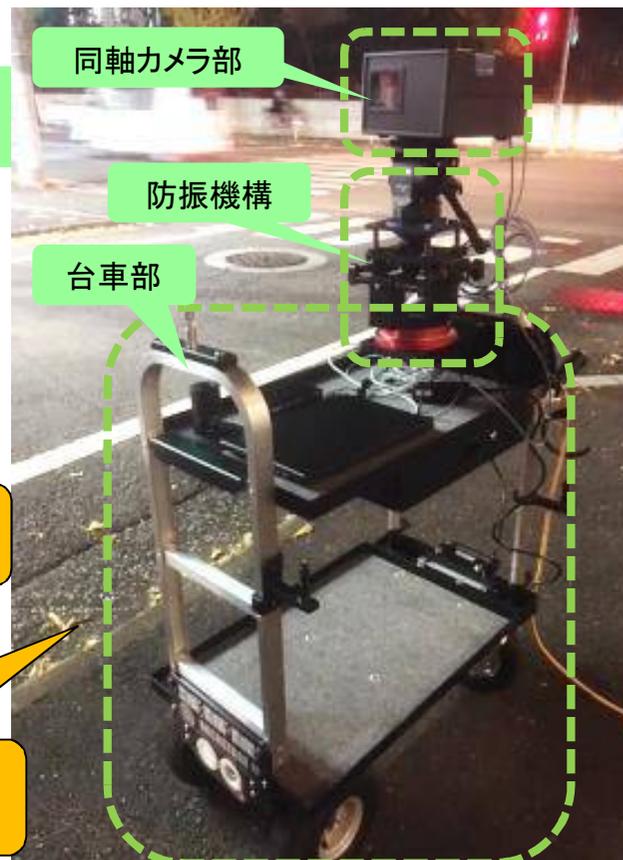
可視 + 赤外 同軸カメラの設計



可視カメラ/赤外カメラの2台を搭載したカメラ

防振機構を備えた台車に可視 + 遠赤外同軸カメラを搭載。

可視 + 遠赤外撮影装置



可視+遠赤外での予備実験

約1万7千枚のデータセット作成
領域検出を想定したセマンティックセグメンテーションのアノテーションを実施

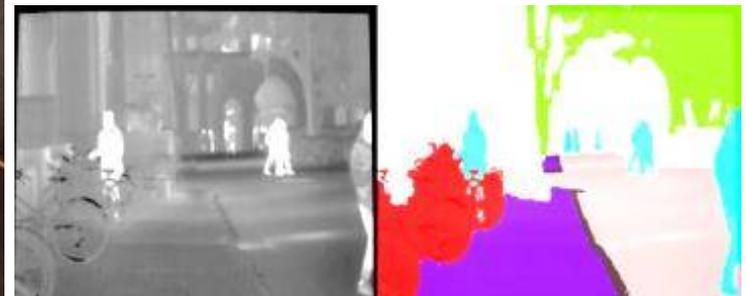
可視画像

可視画像アノテーション

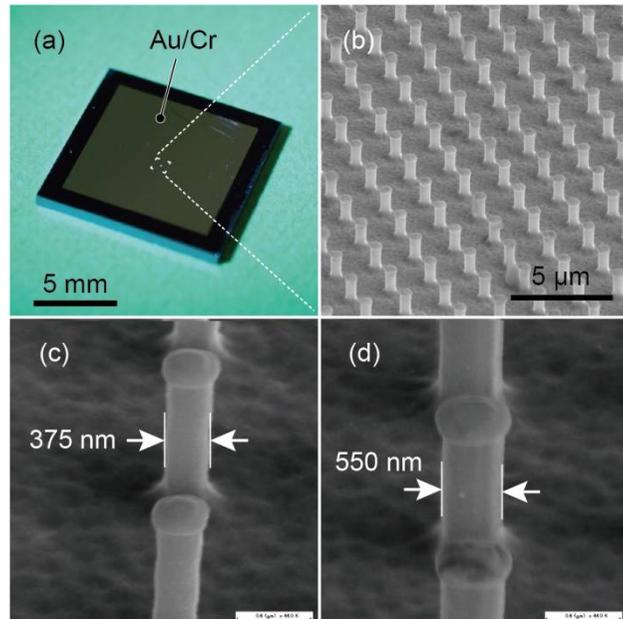


遠赤外画像

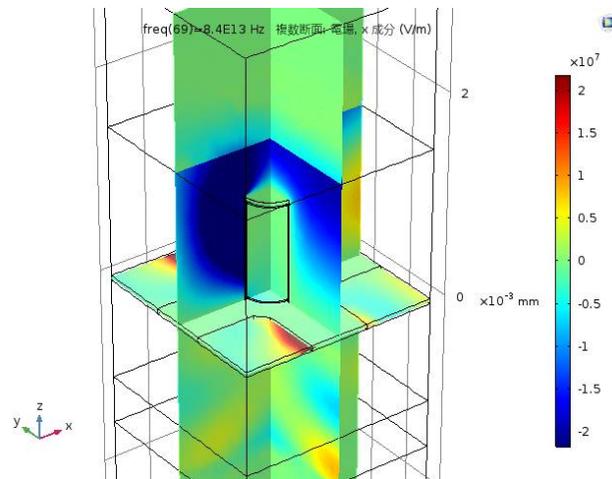
遠赤外画アノテーション



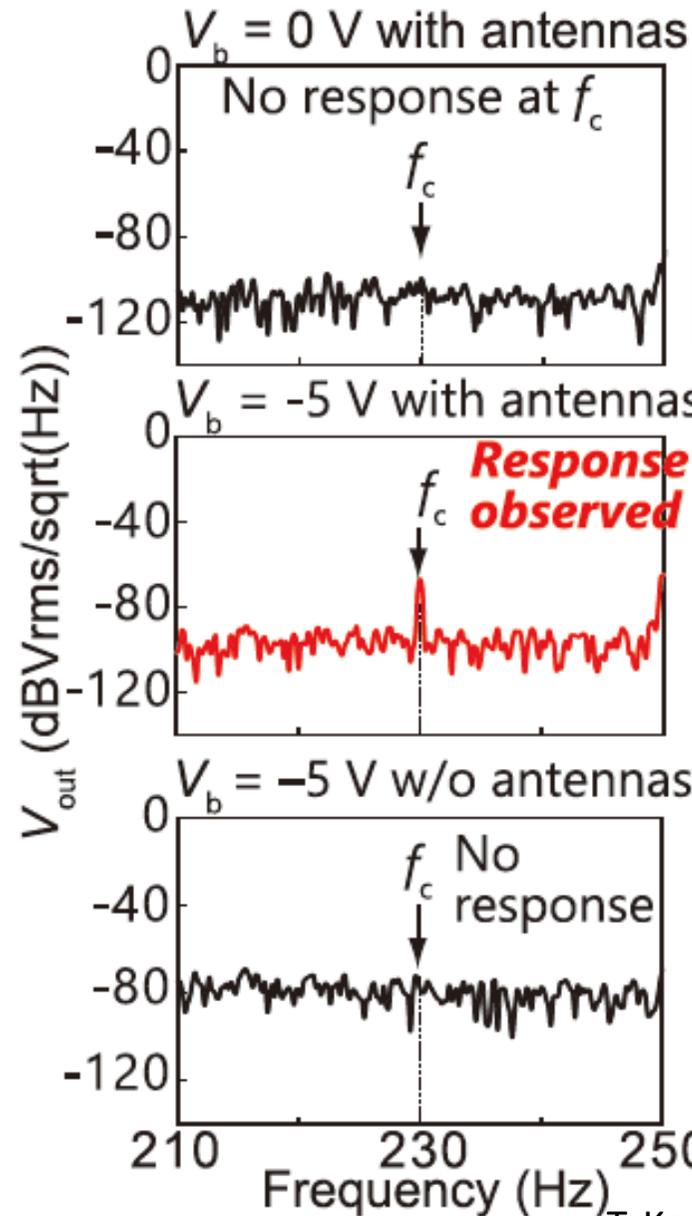
約1万7千枚の可視+遠赤外 同軸画像/アノテーションのデータセットを構築



金ナノアンテナ構造で赤外光吸収



モノポールアンテナとして機能



波長 $3.2 \mu\text{m}$ 以上の
中赤外光だけ照射
バイアスの有無
アンテナの有無で比較
230 Hzで信号変調
(S/N向上のため)

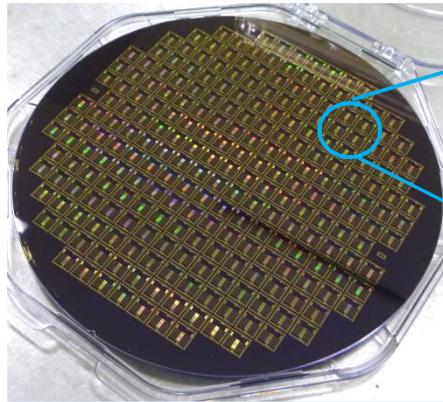
バイアスありかつ
アンテナありの
条件下でのみ
中赤外の光をクリア
に検出できることを
確認

読み出し回路と
組み合わせた
イメージャデバイスの
実現を目指し研究
開発を進めている

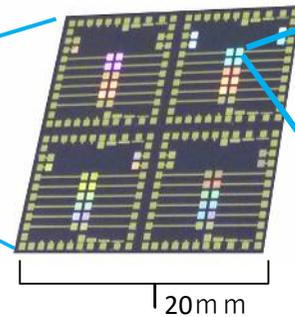
「Si中赤外光検出素子実証検証」

8インチSi基板を用いてSi中赤外光検出素子を試作。中赤外検出素子の基本的な光検出性能を向上するため、暗電流低減及び感度向上を果たす、ナノアンテナ構造体構造・加工方法を開発

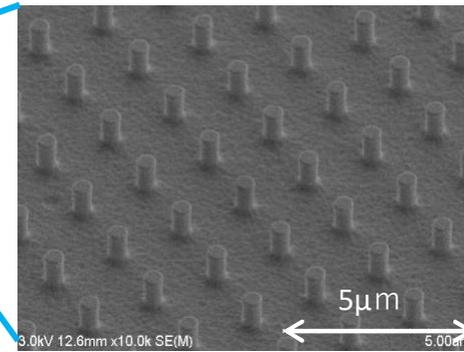
(Si中赤外素子試作基板、チップ外観)



中赤外検出素子試作8インチ基板

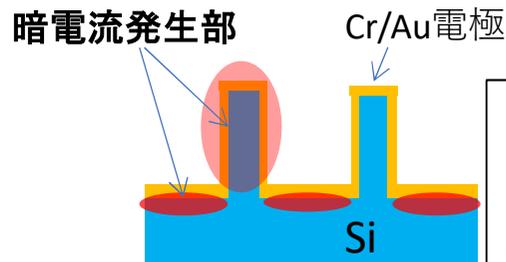


中赤外検出素子TEGチップ



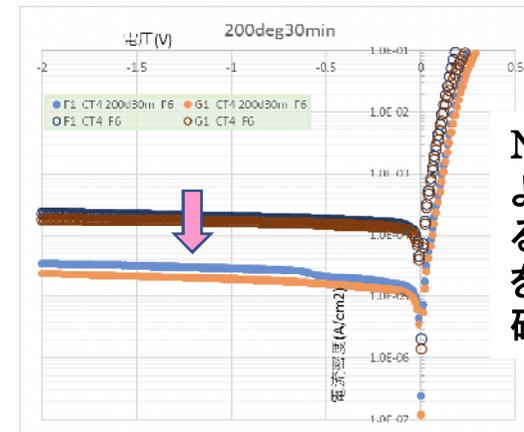
ナノアンテナ構造体アレー

(暗電流低減)



ナノアンテナ構造体断面図

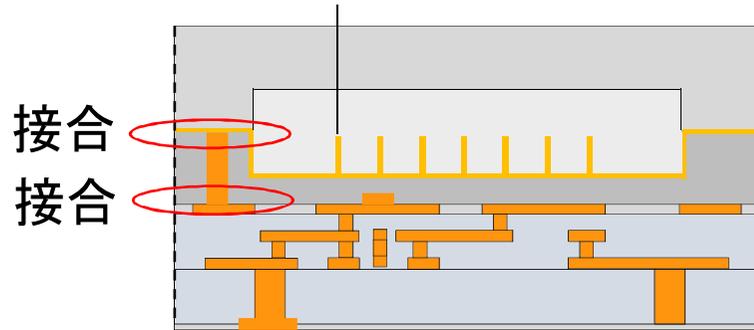
暗電流発生部構造に対応した、低減加工条件、パッシベーション構造を検討



ナノアンテナショットダイオードIV特性

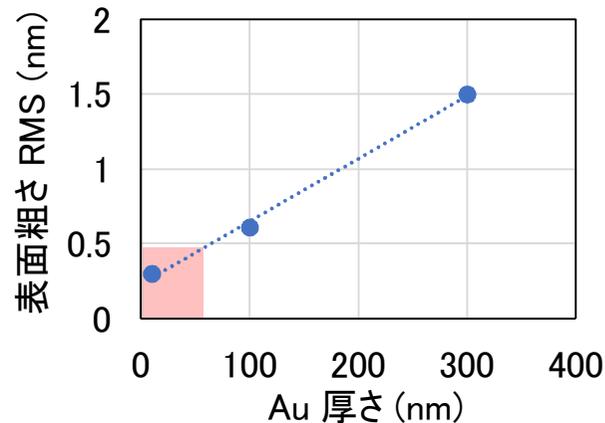
N₂アニールにより暗電流となる逆方向電流を低減効果を確認

ナノ光共鳴アンテナ構造



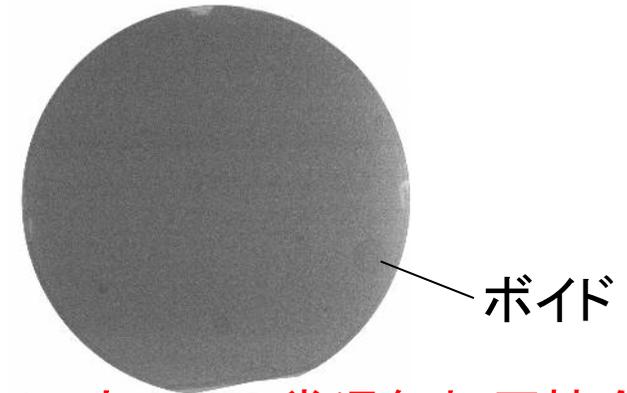
ナノ光共鳴アンテナ表面に成膜する数十nmのAu薄膜を利用してナノ構造を保護するウェハを低温接合する。

スパッタ成膜したAu厚さと表面粗さの関係



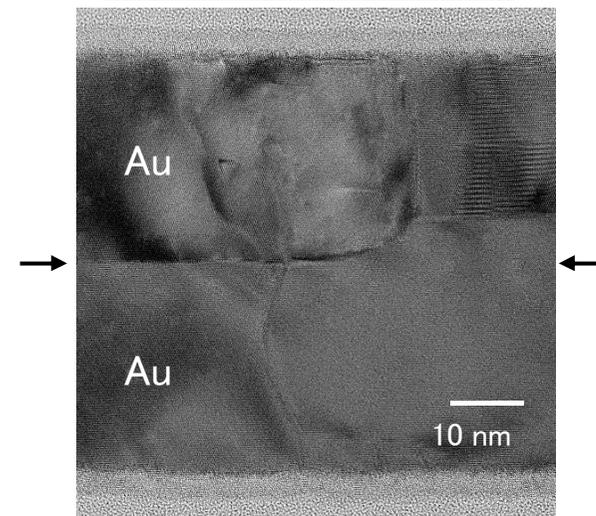
平滑な(< 0.5nm) Au薄膜を利用できる。

赤外透過イメージ

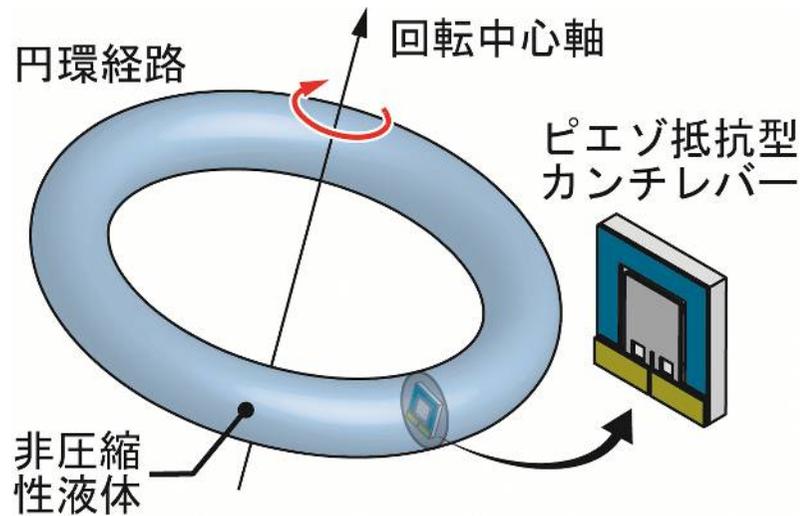


4インチSiウェハの常温無加圧接合(大気雰囲気)が可能。

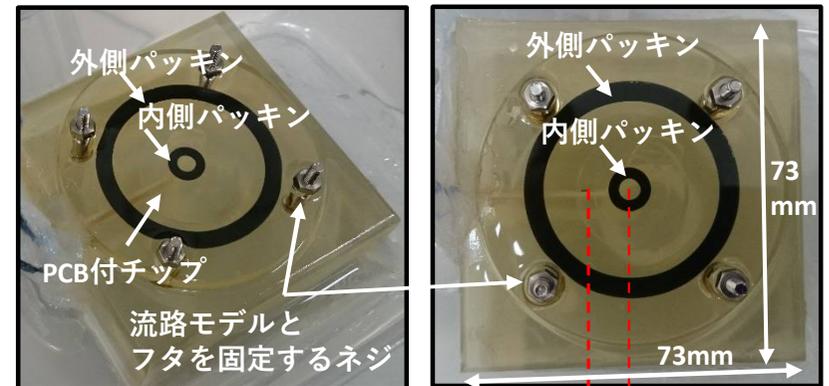
高分解能TEM像



原子レベルでの接合を実現

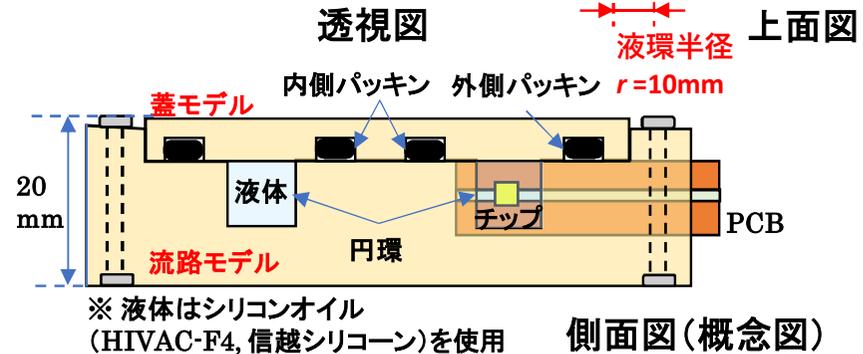
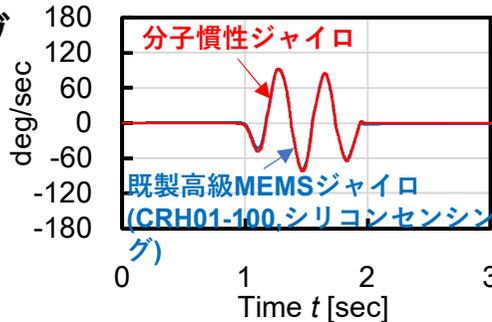


試作した分子慣性ジャイロ



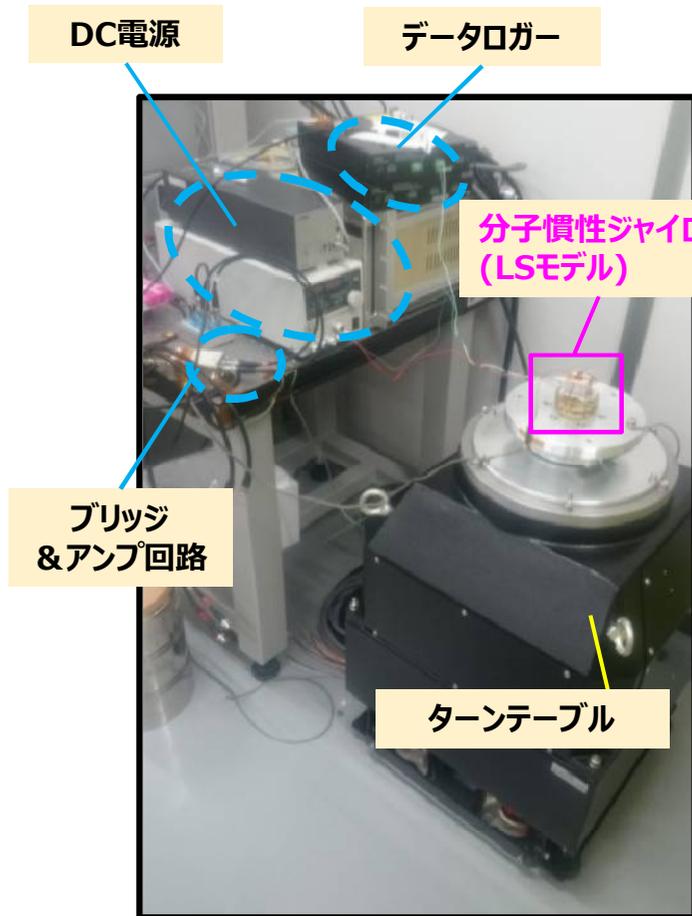
センサに対して静止した液体に働く回転運動に起因する慣性力を、高感度なMEMSピエゾ抵抗型カンチレバーを用いた圧力センサで検出する。

$$P = 2\pi \rho r^2 \ddot{\theta}$$



1軸のラージスケールモデルを設計・試作完了
 設計通りの角加速度感度を持つこと、他軸感度が1/100、
 加速度感度が0.1deg/s/G以下であることを実証し、独立性の高い円環の設計指針の確立

<従来の評価>



<今後の評価>

分子慣性ジャイロ (LSモデル)

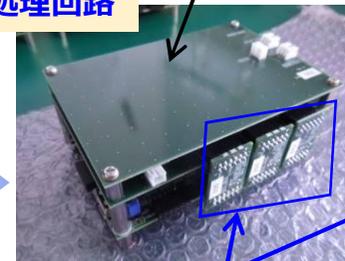
検出信号処理の高度化と一体化により
高精度ジャイロセンサを実証する

新しいLSモデルに写真を変更してください⇒

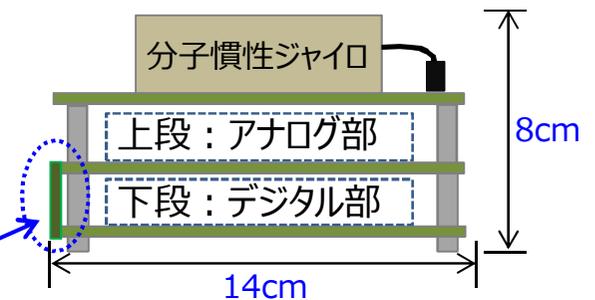
信号処理回路



LSモデル、ブリッジ & アンプ回路、データロガーの一体化



回路構成



ノイズ低減対応

A/D基板接続をプリント基板で接続

移動体に搭載可能な体格

回路ブロック図

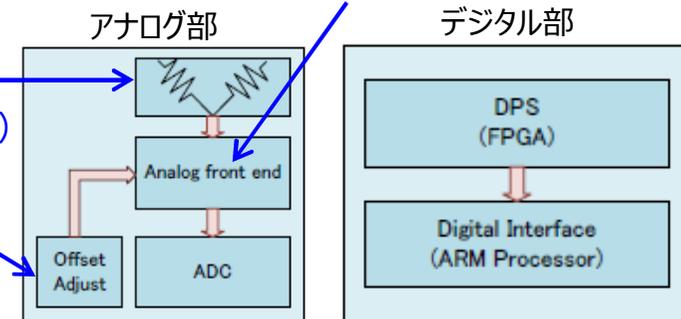
温特調整対応

可変抵抗
ゼロ点補正(粗調)

D/A制御による
ドリフト補正
(ゼロ点微調)

感度調整対応

増幅率調整

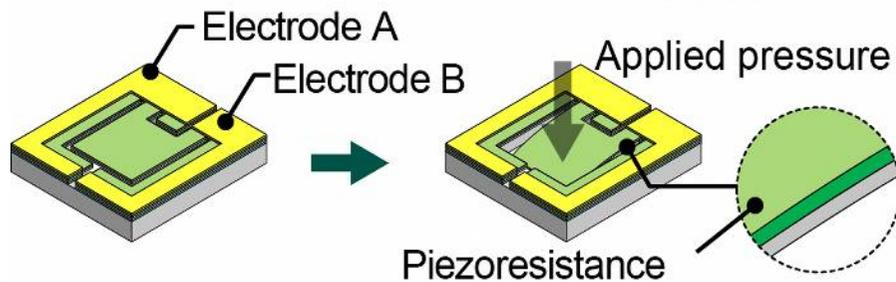


実環境評価を想定し、移動体に搭載可能であり、試作したLSモデルに対応(サイズ、感度、温特調整)した1軸ジャイロ用低ノイズ信号処理回路を試作完了

カンチレバー型センサの検出原理

A-B Resistance : R

$$R = \Delta R + R_0$$



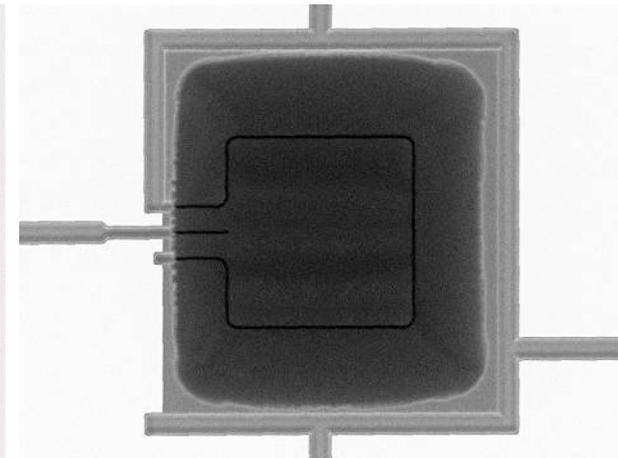
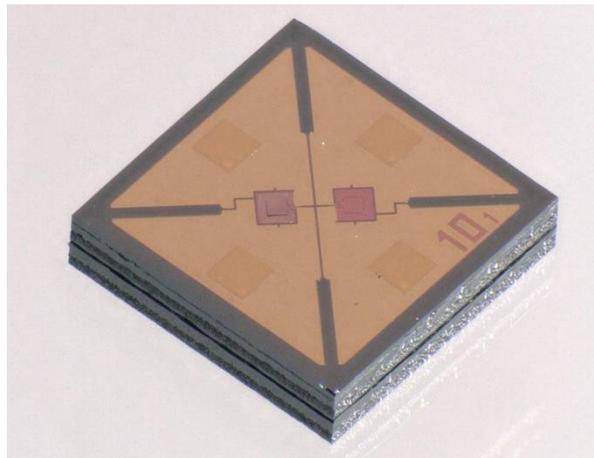
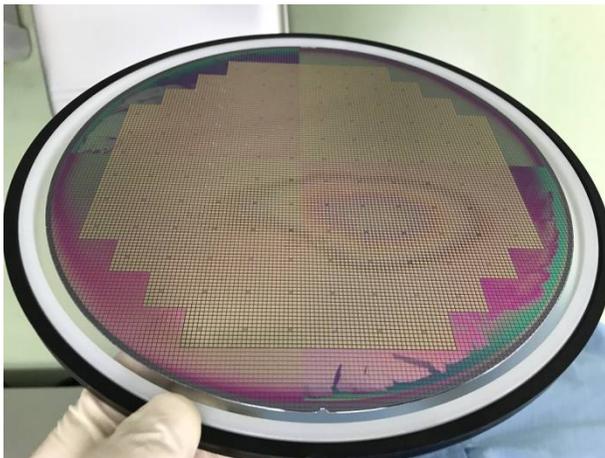
カンチレバー上面と下面の圧力差により,

表面のピエゾ抵抗の抵抗値が変化

以下の設計により感度向上を実現

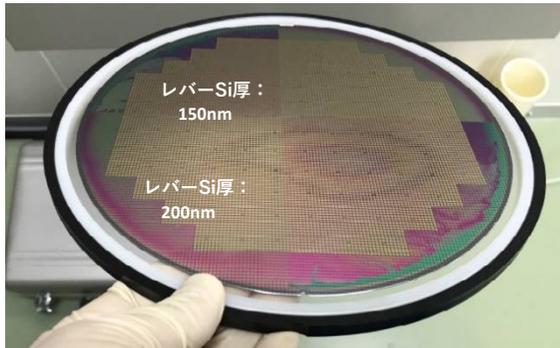
- ・カンチレバー厚さ
従来300nm → 200nm
- ・カンチレバーの足
従来4本 → 2本

試作したピエゾ抵抗型カンチレバー(8インチ基板上にカンチレバー試作)



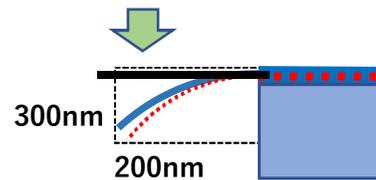
感度 (S/N比) が従来のセンサの2倍以上向上する設計完了、試作したカンチレバーの感度評価し、最大で4倍感度が向上したことを確認

8インチSi基板を用いて、高感度の小型ジャイロ素子を実現するために厚み等、構造を改良したカンチレバーを試作し、従来の10倍以上の高感度のジャイロを開発

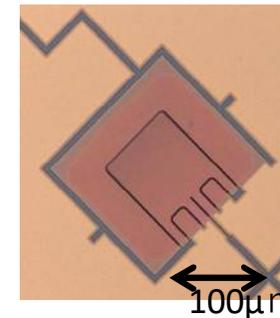


極薄カンチレバー試作8インチSi基板
イシング後外観

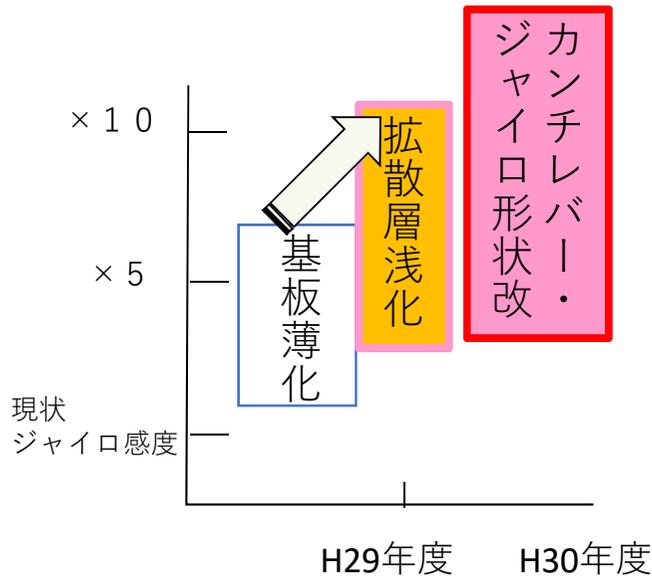
(Siカンチレバー薄化)



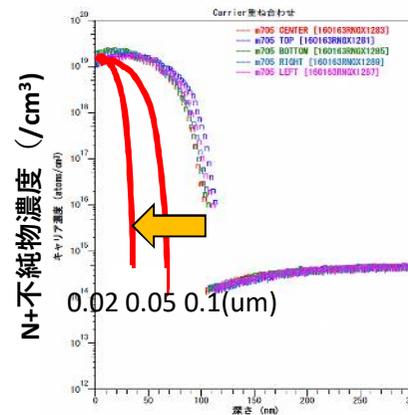
レバーSi厚を薄くし、3~5倍感度向上



レバー厚 200nm カンチバー外観



(ピエゾ抵抗層薄化)

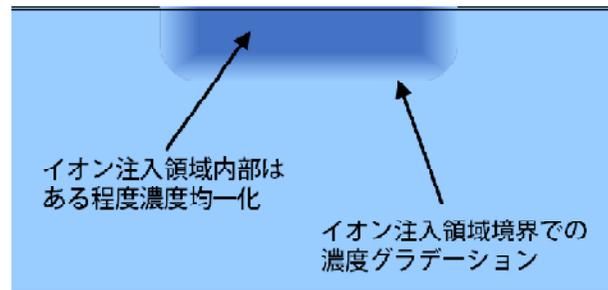


従来の1/2以下のピエゾ抵抗層厚を薄化し、数倍の感度向上

N+拡散層深さ

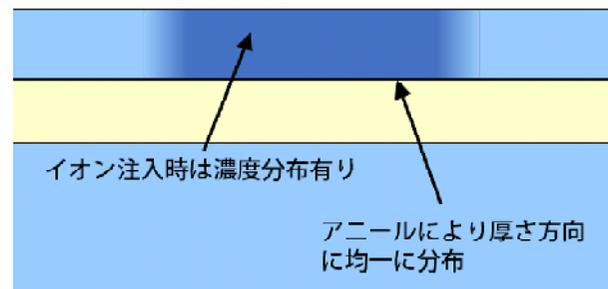
極薄SOIピエゾ抵抗素子による高精度センシング

従来法：イオン注入+アニールによるピエゾ抵抗形成

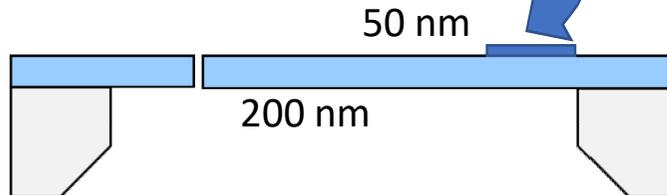


ドーピング濃度不均一によるセンシング精度低下

超薄膜SOIウェハによるピエゾ抵抗素子

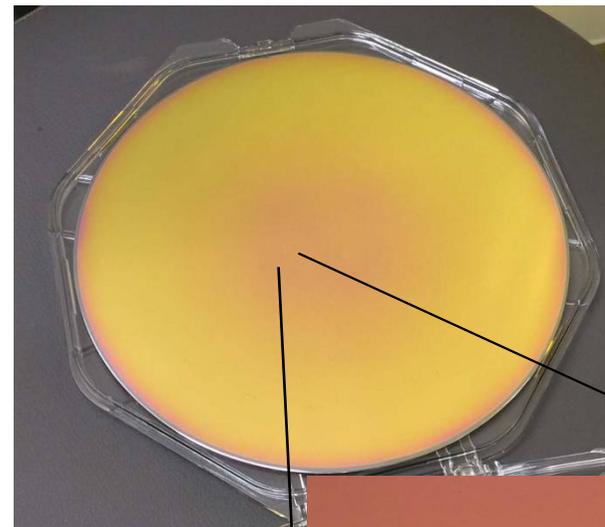


接合、転写



均一ドーピング濃度層の接合転写によるセンシング精度向上

○Si活性層厚さ50nmのSOIウェハ(金色)にピエゾ抵抗素子を形成



○厚さ50nmのSi活性層の接合転写技術を開発