

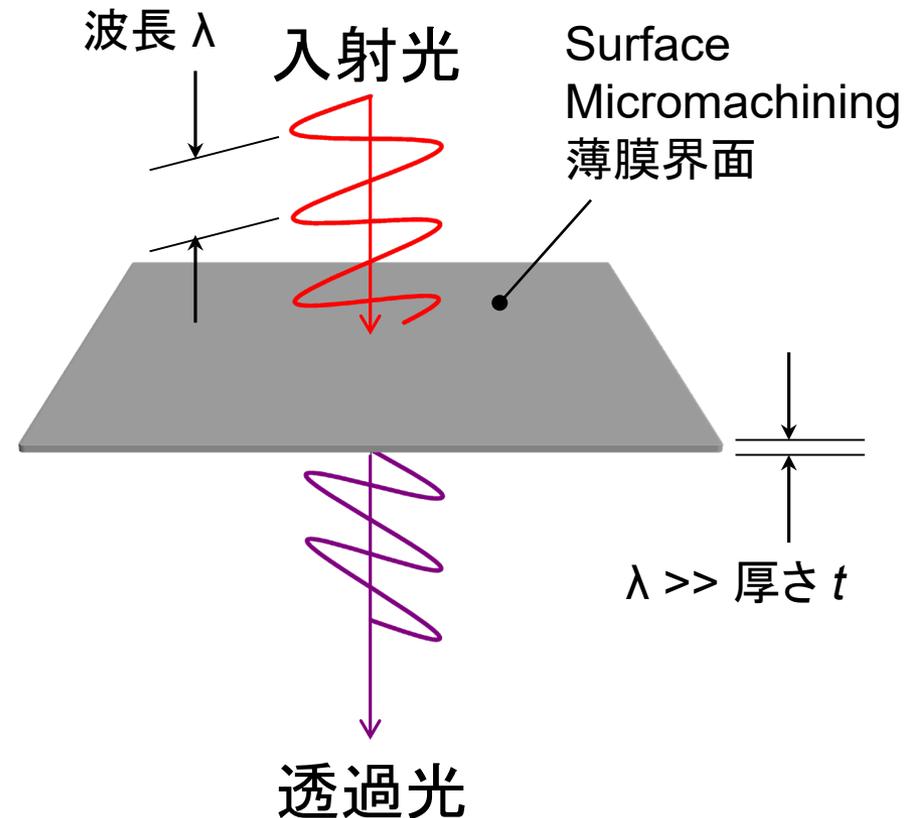
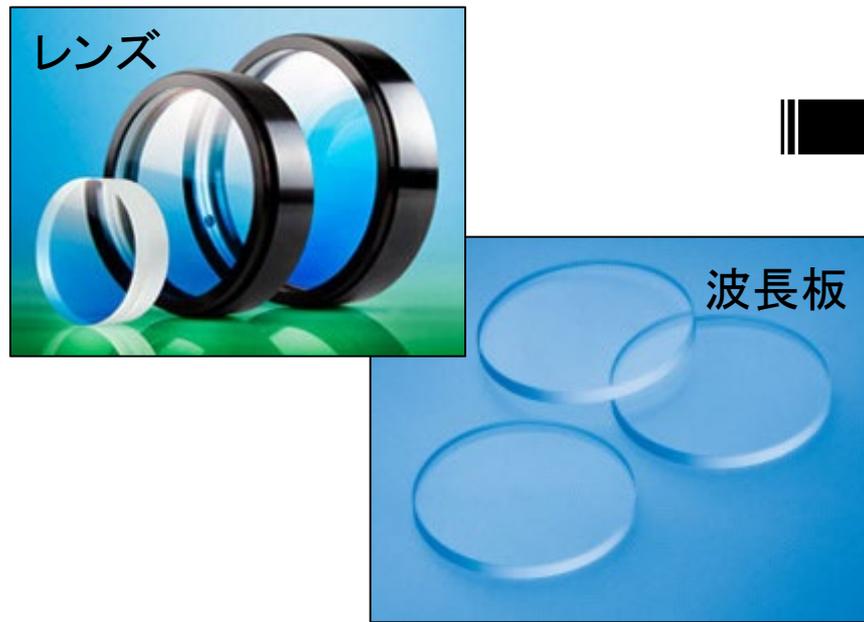
MEMSで作るシリコン製赤外線受光素子

電気通信大学大学院情報理工学研究科
機械知能システム学専攻
准教授 菅 哲朗

2021.05.13

自己紹介: MEMS薄膜構造を利用した光の操作

- 波長以下の極薄MEMS構造で光の状態制御・計測
 - 偏光状態、屈折方向、強度

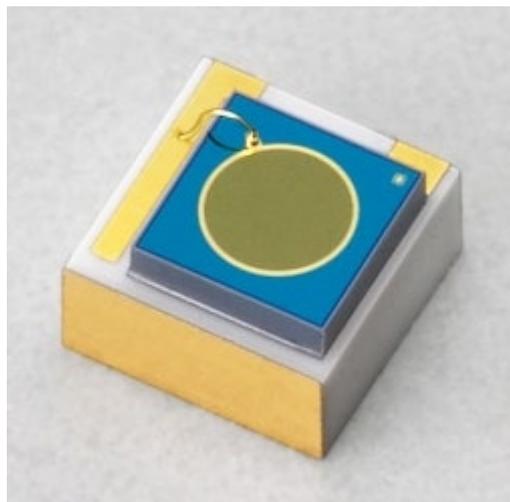


通常、波長よりも大きな
バルク構造で光状態制御
コンパクト・機能集積光学デバイス
ロボットのビジョンなどの出口を狙う

波長より薄い界面で
光の状態制御

①MEMSシリコン赤外センサの研究

赤外光検出器(量子型)



InGaAsフォトダイオード
(インジウムガリウムヒ素)
0.9~1.7 μm 対応



InAsSb光起電力素子
(インジウムヒ素アンチモン)
~5 μm 対応

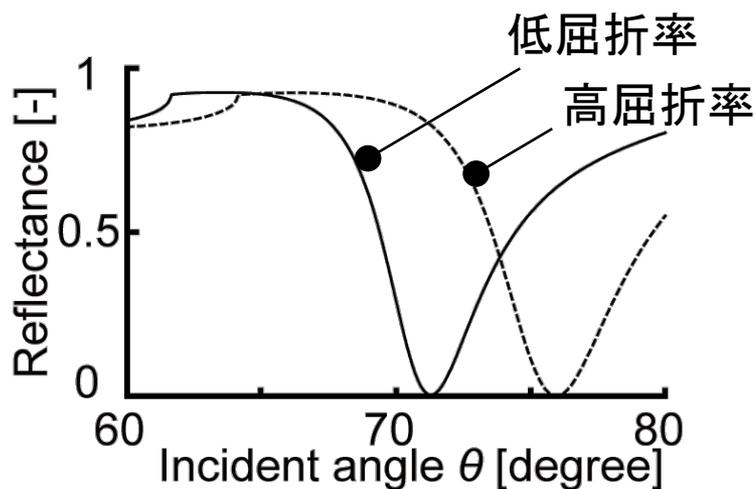
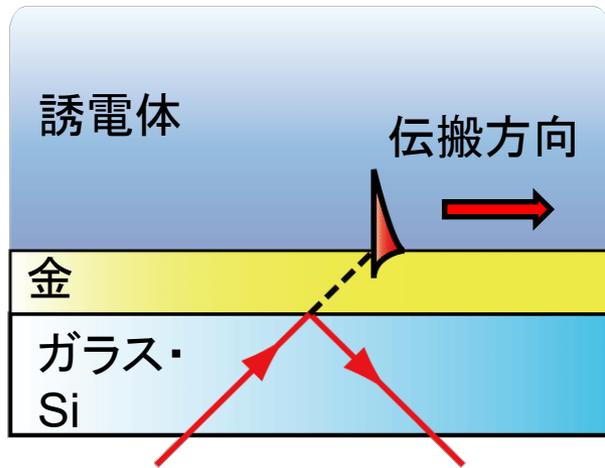


InSb光起電力素子
(インジウムアンチモン)
3~5 μm 対応

- 化合物半導体の基板の価格はシリコンの10倍
- シリコンデバイスとの一体形成困難
- シリコンで赤外光ディテクタができれば、CMOS可視光ディテクタやMEMSと混在可能
- シリコン単体では1.1 μm 以上の赤外波長を検出不可

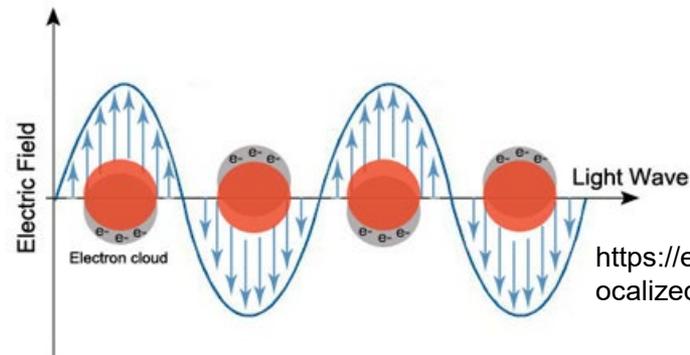
表面プラズモン共鳴に着目

■ 伝搬型表面プラズモン (SPR)

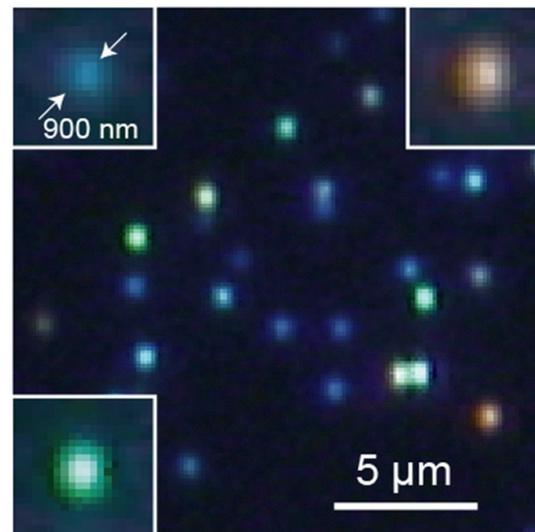


鋭い共鳴特性により高感度な屈折率変化の検出が可能

■ 局在型表面プラズモン(LSPR)



https://en.wikipedia.org/wiki/Localized_surface_plasmon



銀ナノ粒子の
散乱光の
暗視野像

共鳴波長は
粒子のサイズ
周辺屈折率で
変化、物質検出
に使える

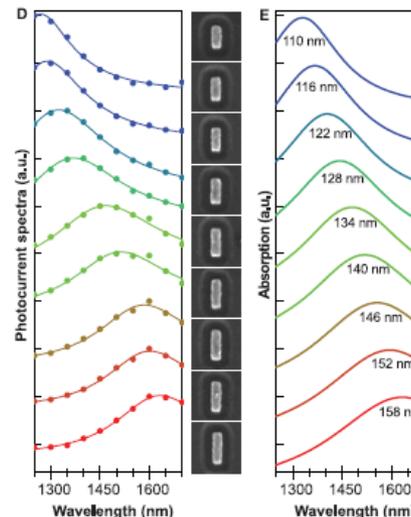
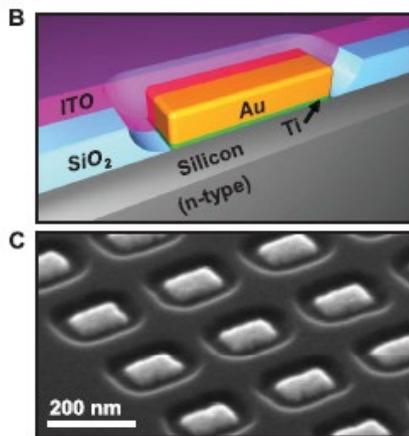
SPRは物質と光との強い相互作用をもたらす
しかし、応答計測に光学機器が必要
MEMSのメリットを必ずしも享受できない

表面プラズモン共鳴を電氣的検出

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

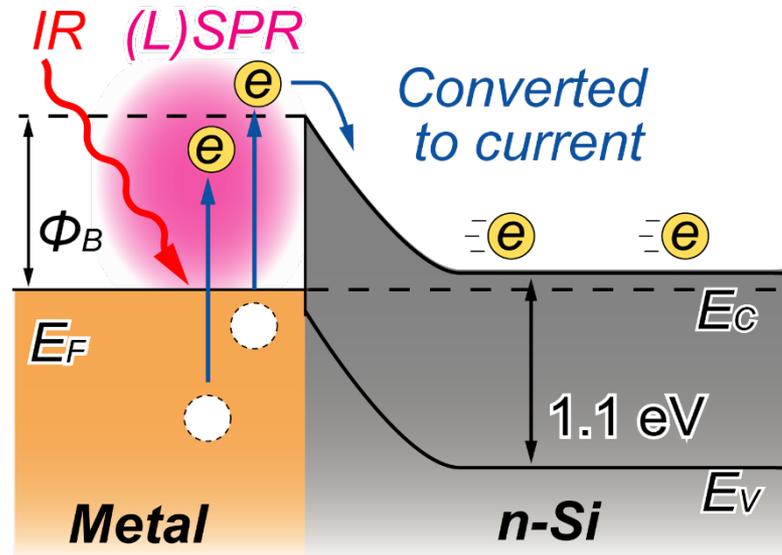
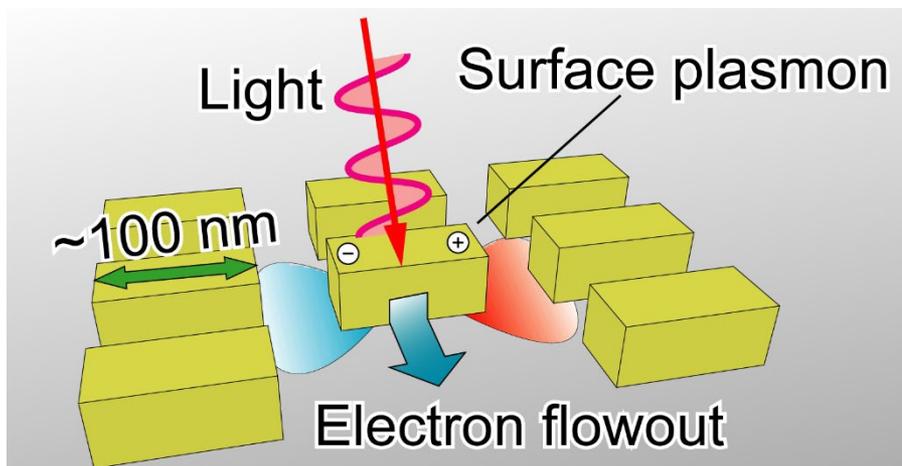
先行研究

Knight, *et al.*,
Science, 2011.



プラズモニック
ナノアンテナ+ショット
キー接合によるプラ
ズモン検出
近赤外光検出が可能

光の検出の原理詳細

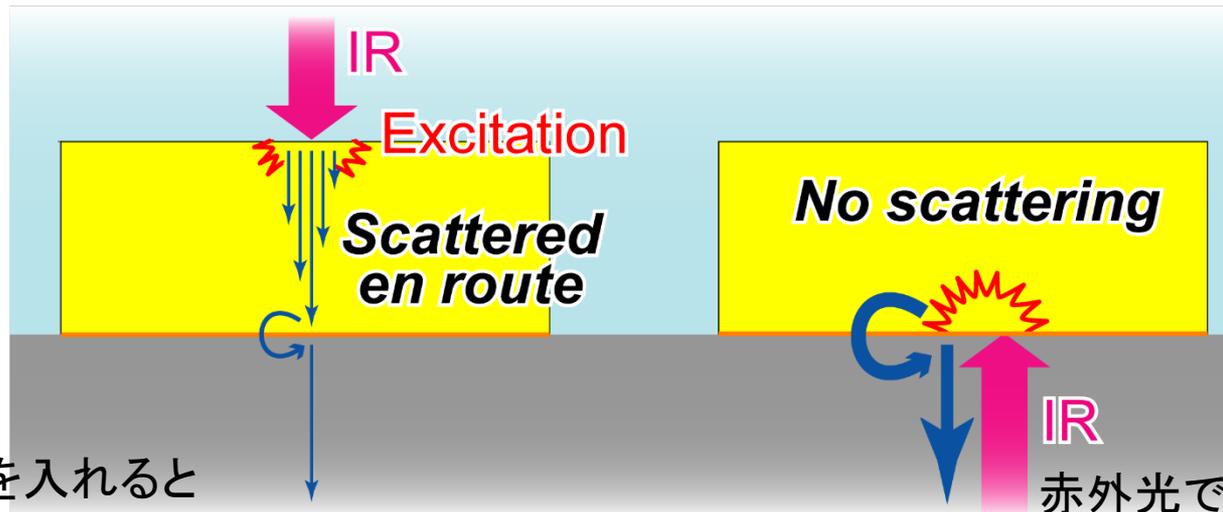


表面プラズモン共鳴を光学によらず電氣的に検出可能

アンテナの構造の検討

Previous

Proposed

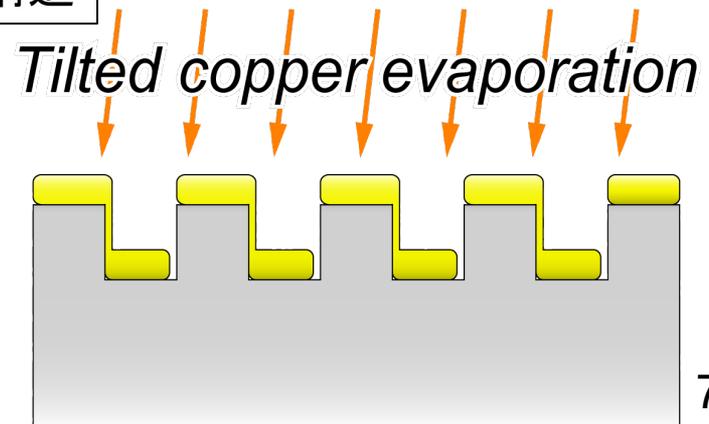
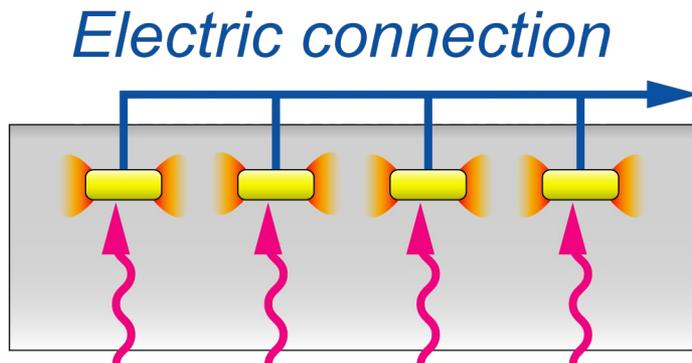


空気側から光を入れると
電子がショットキー到達前
に散乱を受ける

赤外光であればSi透過
裏側から照射する構成で
感度も増大可能

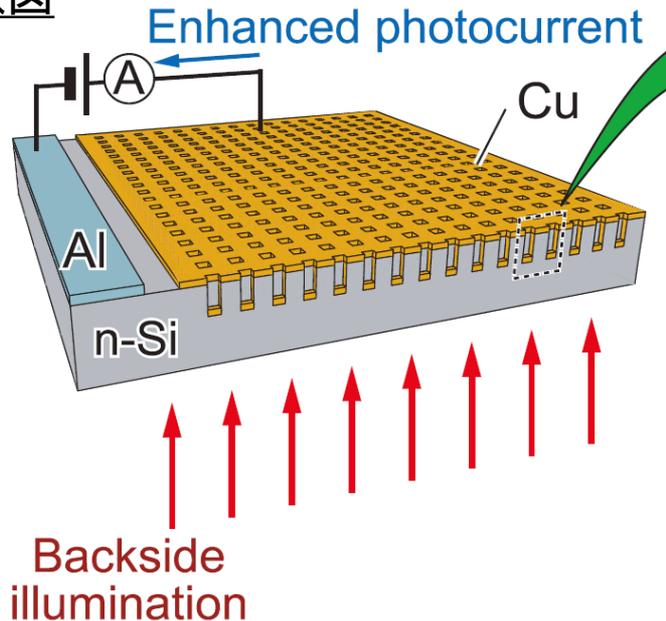
理念モデル

実現構造

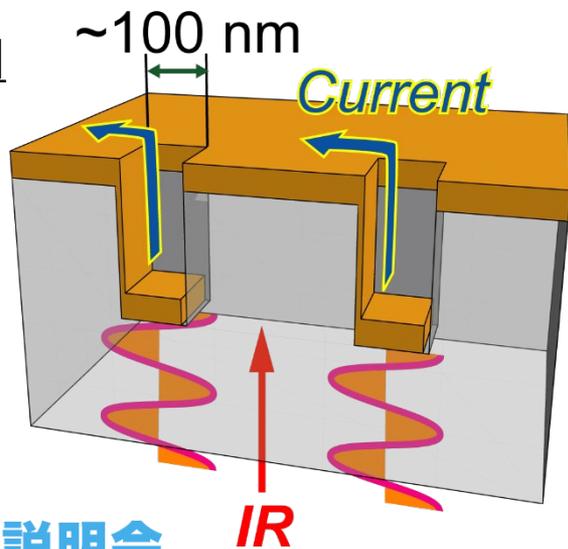


実現した光検出構造

俯瞰図



拡大図

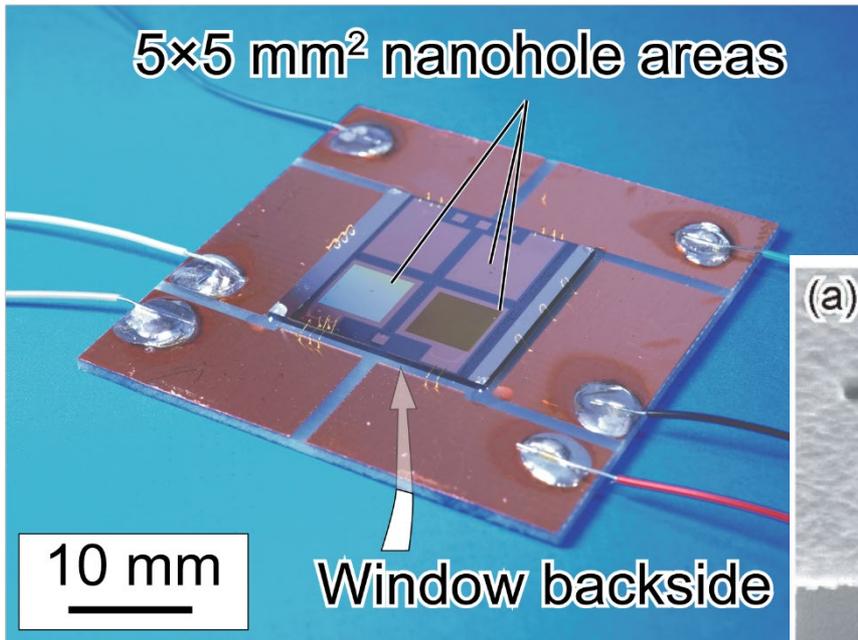


Device No.	1	2	3
w	70 nm	150 nm	240 nm
d	240 nm	410 nm	700 nm
Area B	1000 nm		2000 nm
p Area C	500 nm		1000 nm
Area D	250 nm		500 nm
t	50 nm		

- FDTDシミュレーションであたりをつけて、構造パラメータ設計
- Siは屈折率が高く(3.4程度)、媒質中での波長が短い
⇒ 空気側入射より共鳴寸法微小化

S. Yasunaga, T. Kan, *et al.*, Transducers 2019.

S. Yasunaga, T. Kan, *et al.*, Advanced Materials Interfaces, 2020.

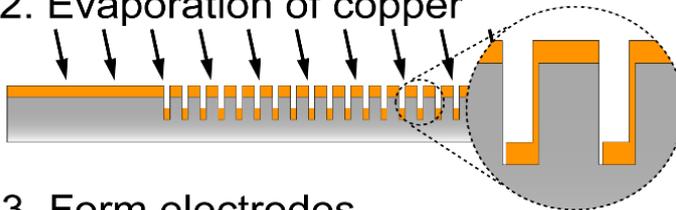


電子線リソグラフィ+垂直RIE
斜め蒸着で製作

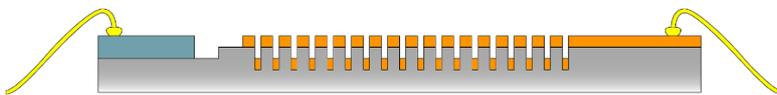
1. EB lithography & Bosch process



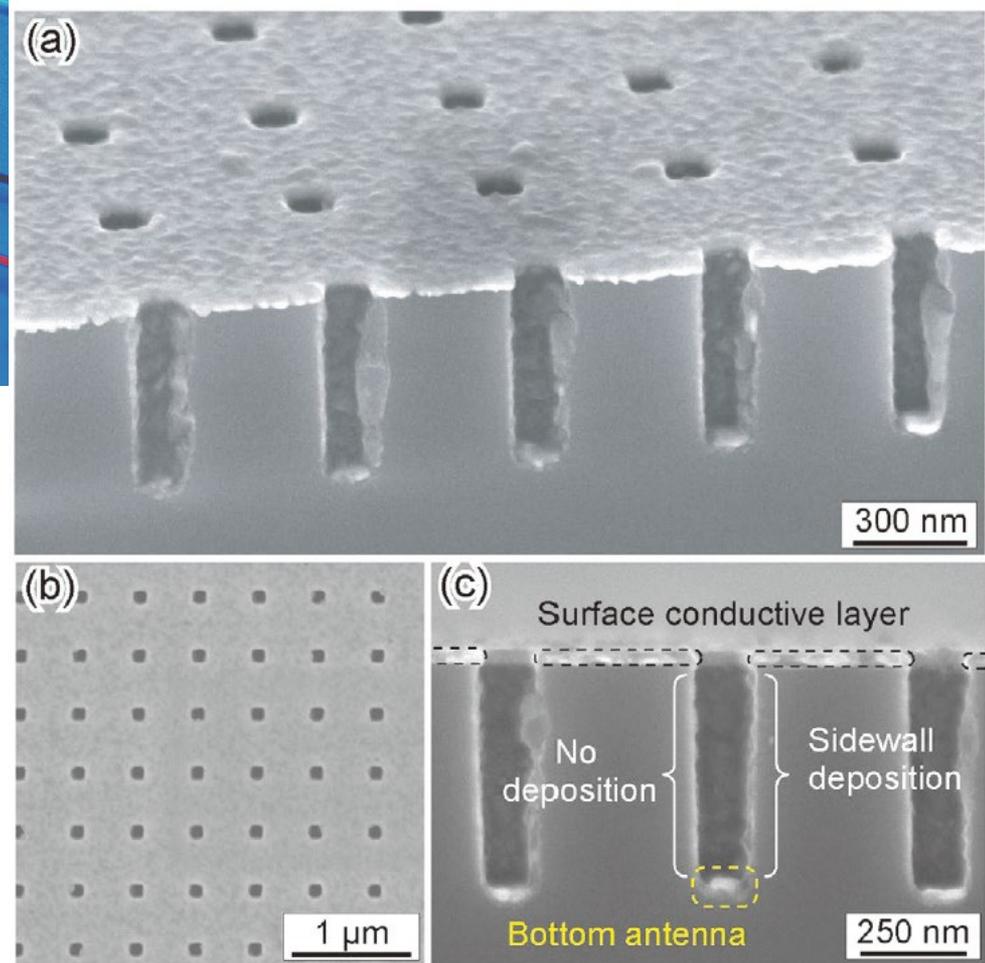
2. Evaporation of copper



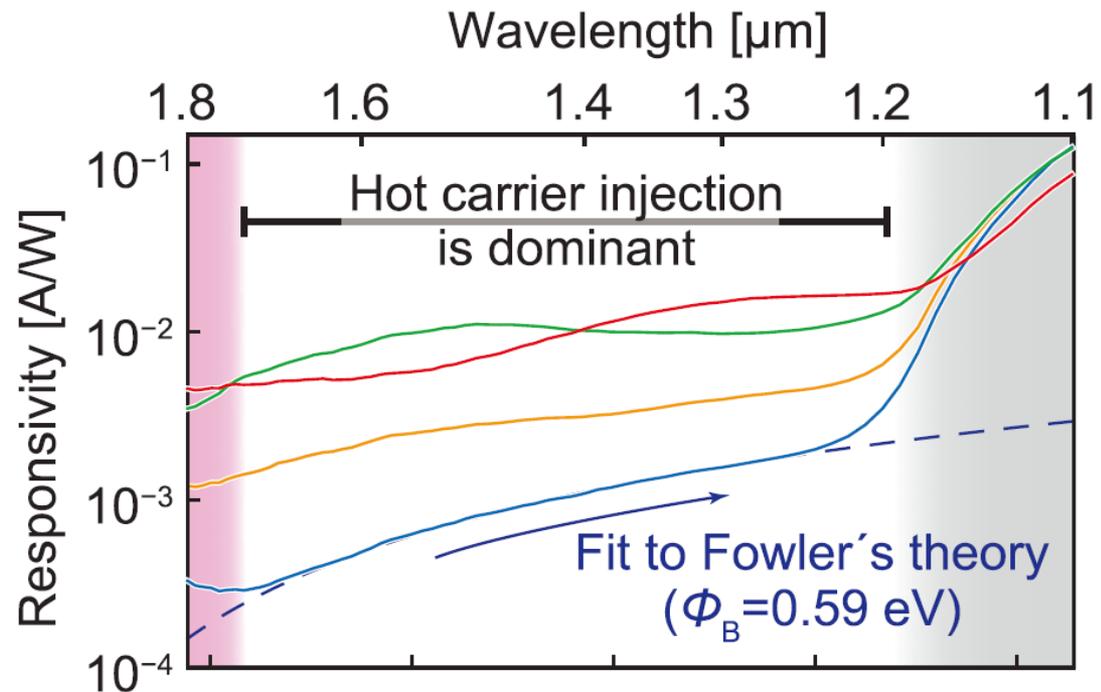
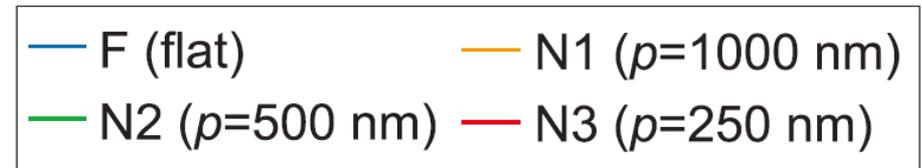
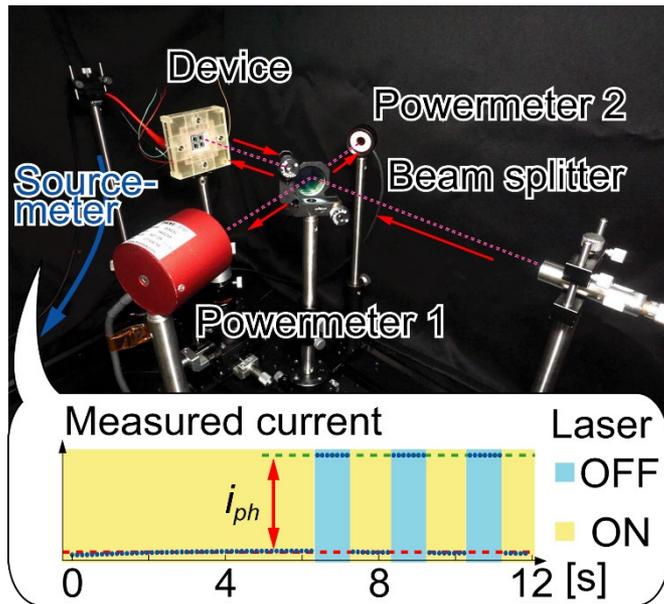
3. Form electrodes



■ n-Silicon ■ Copper ■ Aluminum



赤外線応答感度



• **Responsivity** [A/W]

$$= \frac{i_{ph} \text{ [A]}}{\text{Input laser intensity [W]}}$$

100 μ W – 1 mW

- 背面照射により表側照射と比較して、感度 **2.72 - 28.7 倍**の増大
- ナノアンテナは波長1.76 μ mにおいて、最大**15.4倍**の感度向上の貢献
- 2020の確認では、ショットキー型で最高レベルの応答感度

感度ベンチマーク

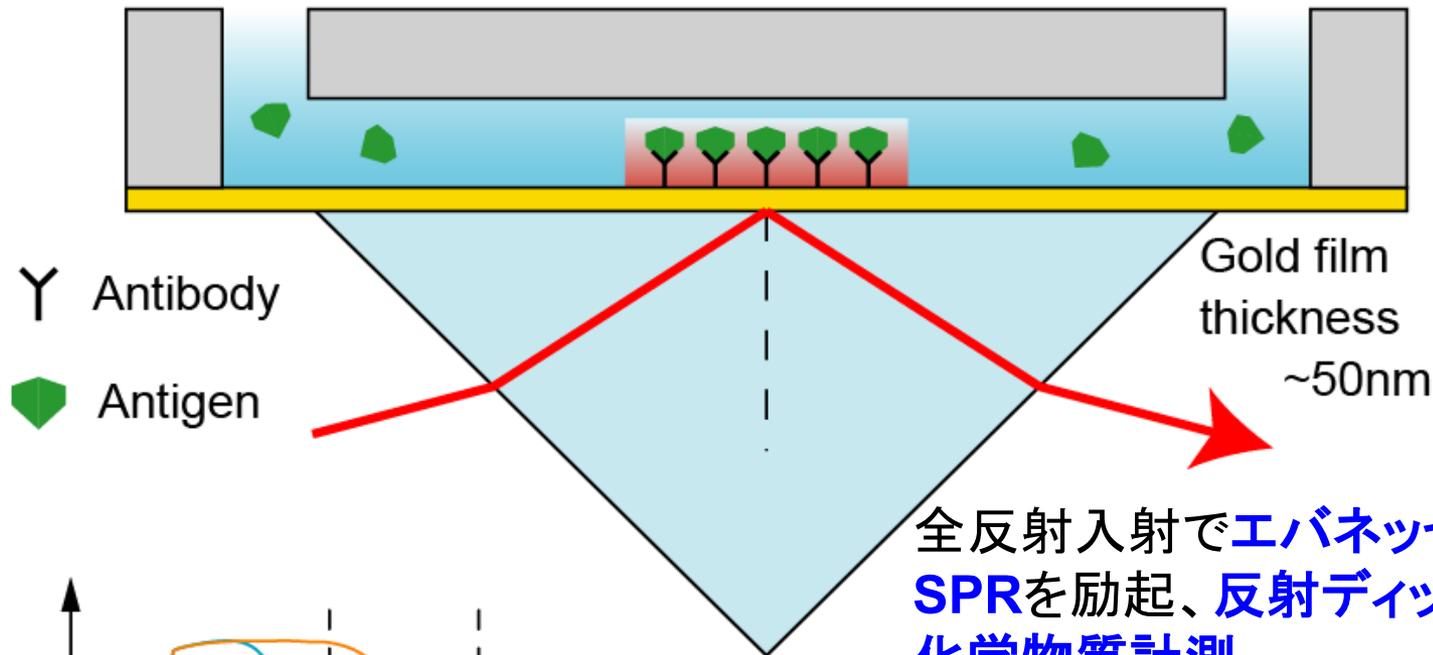
Table 2. Recently reported plasmon-assisted photoemission infrared detectors for array.

Structure	Schottky junction		Responsivity [nA mW^{-1}]			Refs.
	Metal	Φ_B [eV]	@1.31 μm	@1.55 μm	@1.70 μm	
Nanorods (best values from different devices)	Ti/Au	0.50	≈ 8	3.3	2.0	[7]
Metamaterial perfect absorber	Ti/Au	0.54	2900	–	–	[5]
Disordered nanocomposites	Au	0.66	5100	1100	–	[26]
Embedded trench-like antenna	Au	0.73	5854	693	–	[9]
This work (area N2)	Cu	0.60	9800	9800	6000	

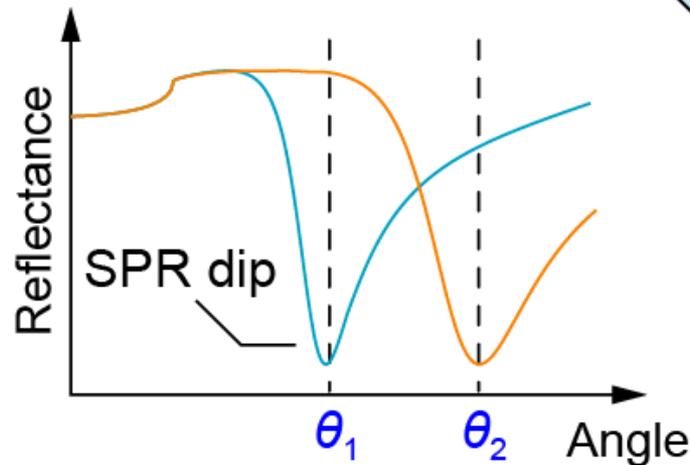
②MEMSウイルスセンサ ～赤外センサの具体的なアプリケーション～

小型化学量センサへの展開

検出技術: 表面プラズモン共鳴 (SPR) 化学量センサ



全反射入射でエバネッセント光発生
SPRを励起、反射ディップ角度から
化学物質計測
敏感なのでラベルフリーで計測
でき、連続リアルタイム計測可能



従来型イムノセンサより高感度
しかし光学部分が大型・小型化できず
本研究で解決、可搬型に技術展開

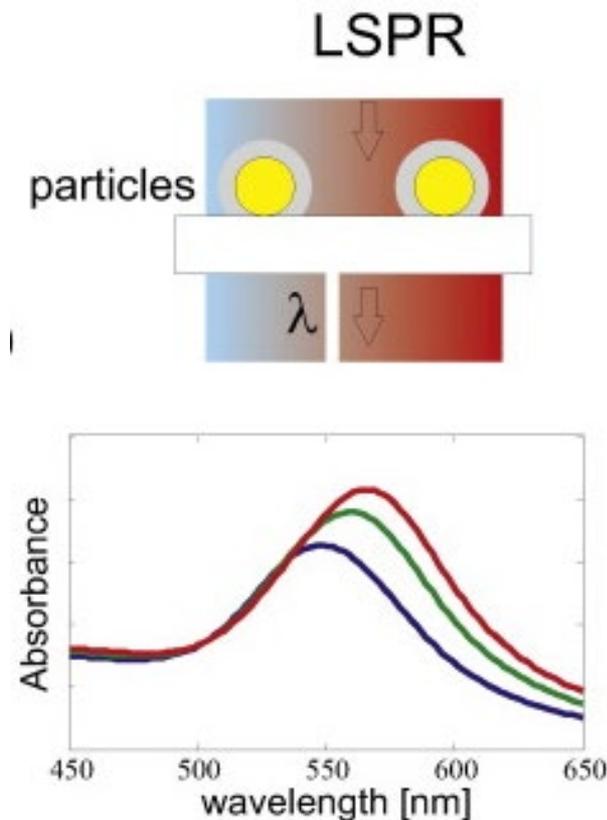
従来技術：大型・光学系が必要

GE biacore 市販大型SPR装置
スタンダード技術
高感度だが、大型、プリズム方式



小型化の制約

小型化向き近年研究が盛んなLSPR
高機能だが、検出に光学系が必要

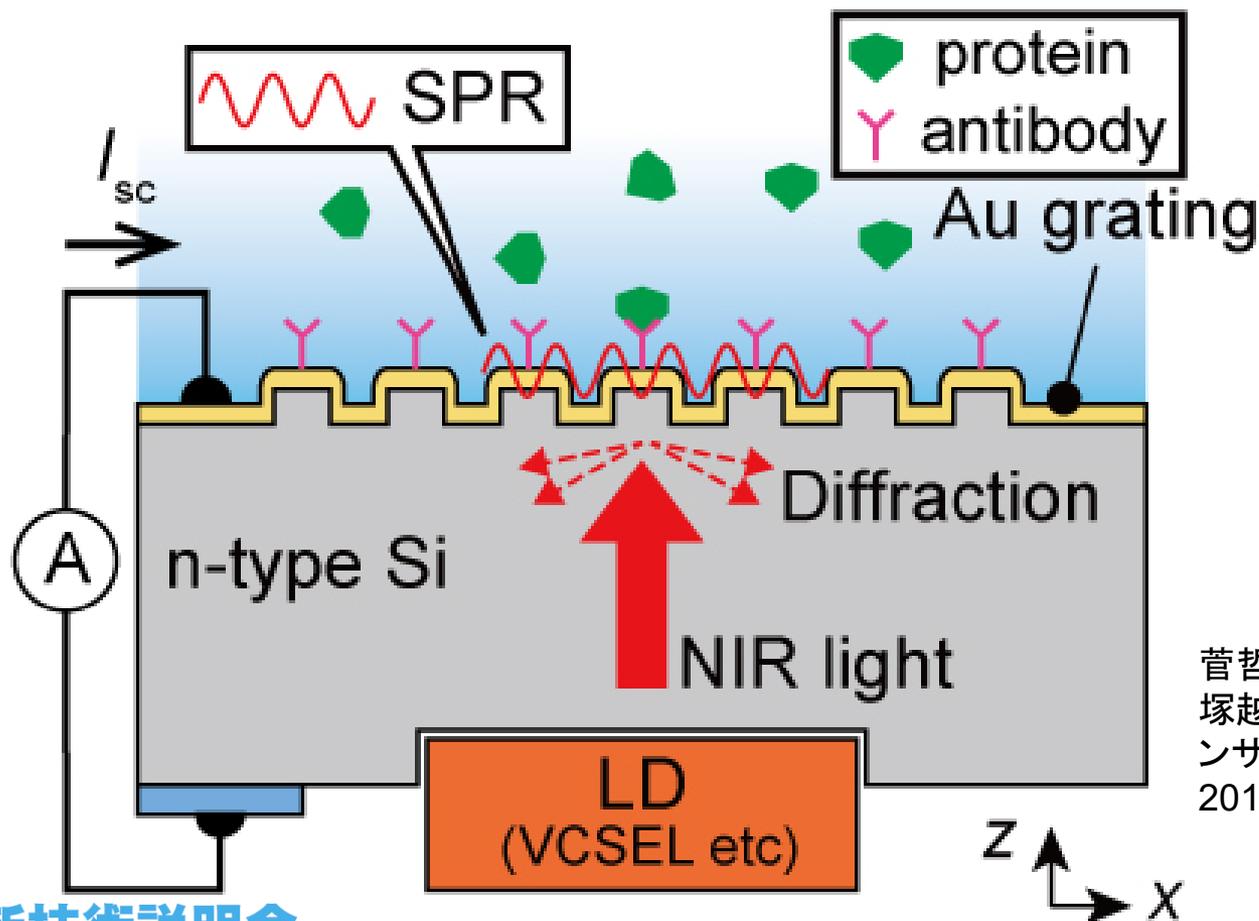


<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214180416300034>

光学系が必要

小型表面プラズモンセンサの提案

- 表面プラズモンの励起に回折格子によるエバネッセント光
- シリコンをロスなく透過する近赤外光を利用
- 背面垂直照射で、光学系は実質ゼロに



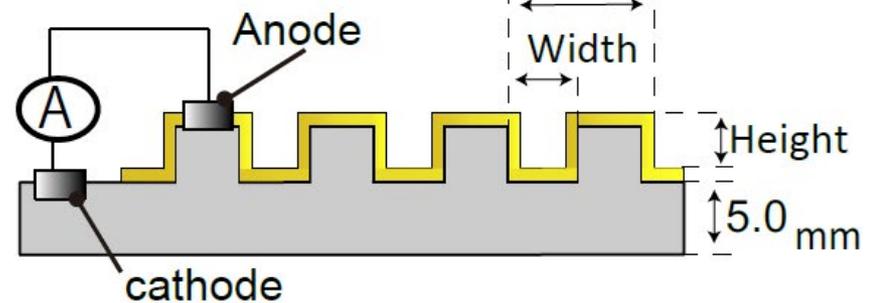
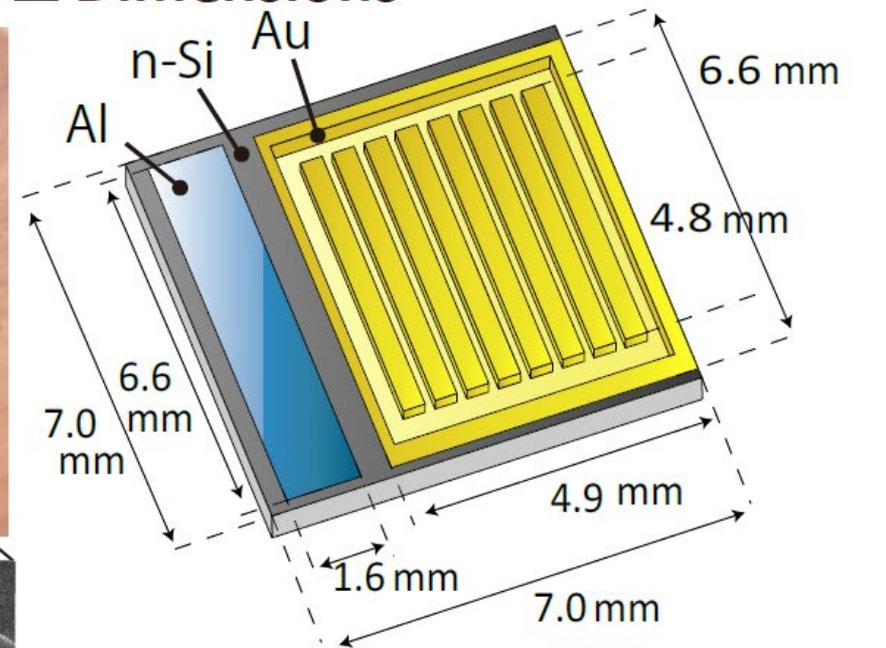
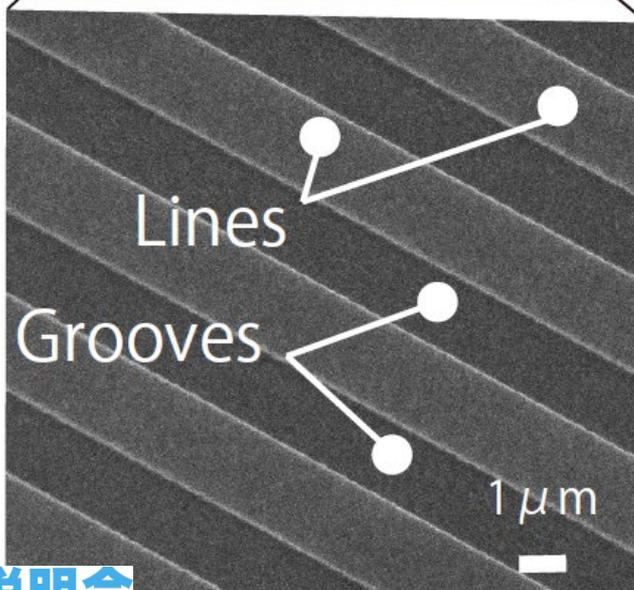
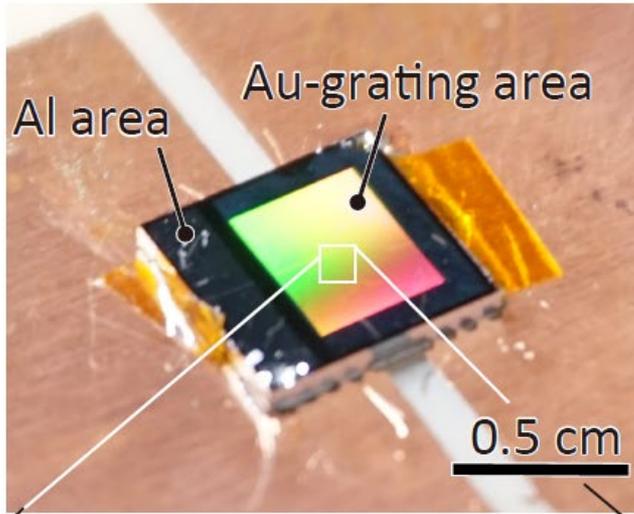
小型ワンチップ化
が可能な技術

現在半導体
デバイス部分の
研究開発に注力

菅哲朗, 石原拓哉, 下山勲, 野田堅太郎,
塚越拓哉, “計測用デバイス及び計測セ
ンサ,” 出願番号 2017-092710, 特開
2018-189523 (出願中、大学単独)

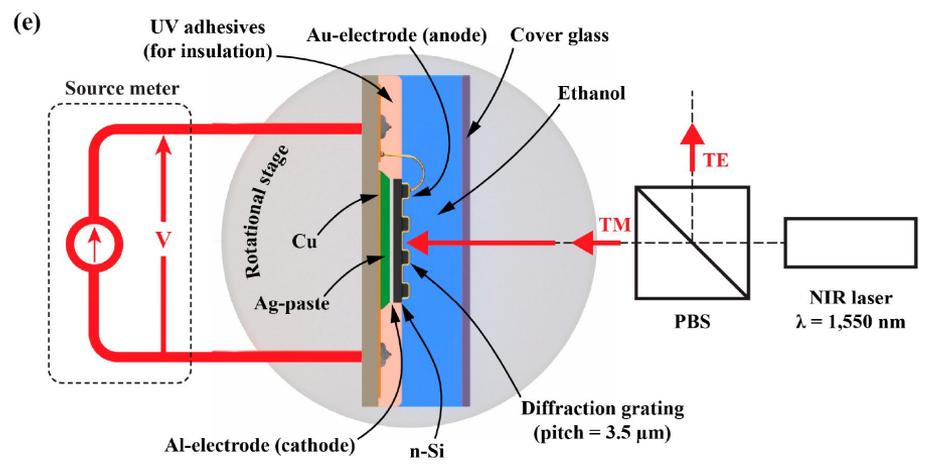
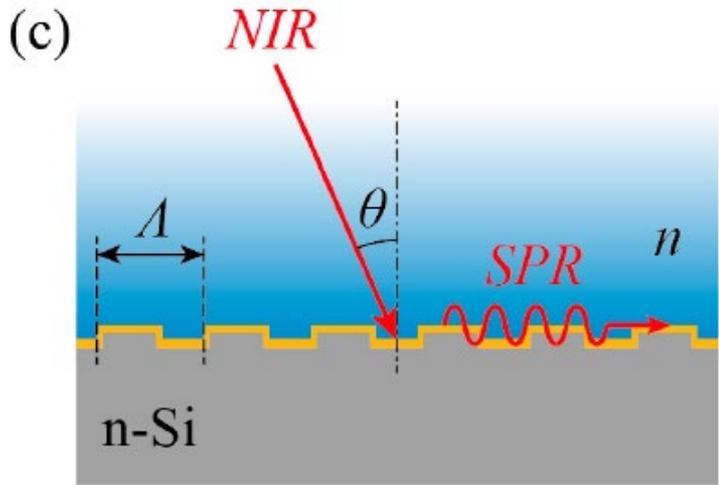
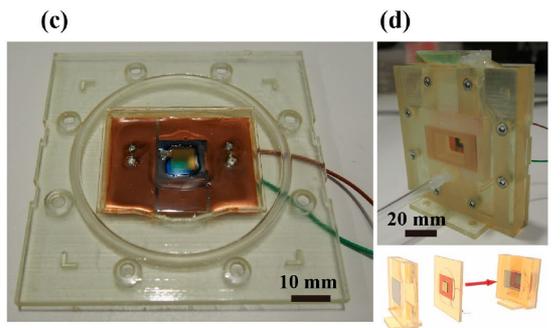
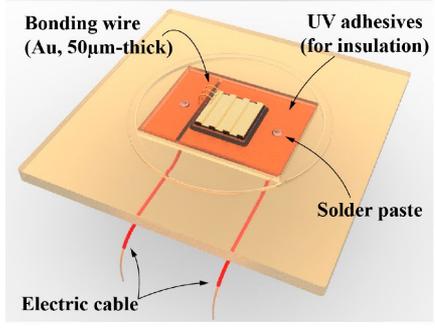
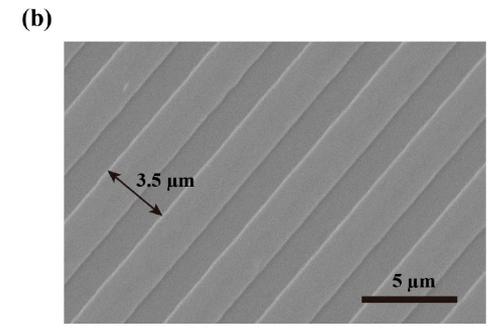
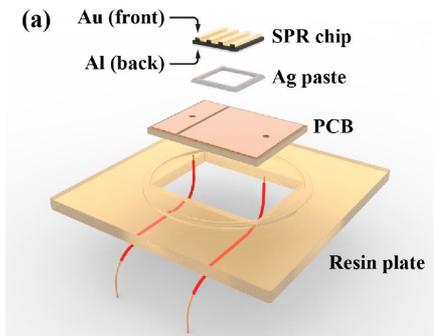
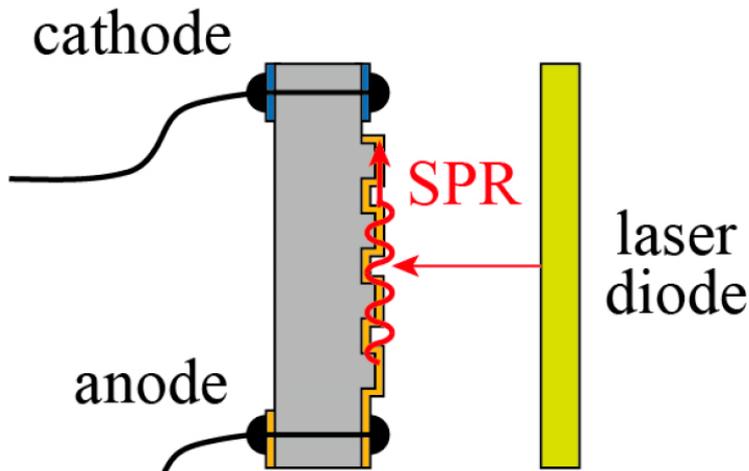
プロトタイプデバイス

■ Photos of the device ■ Dimensions



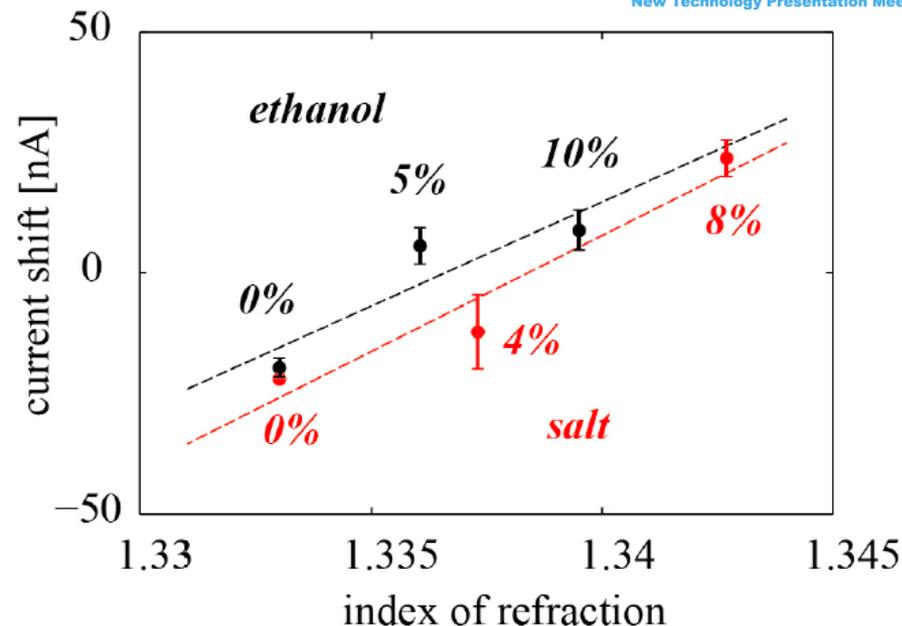
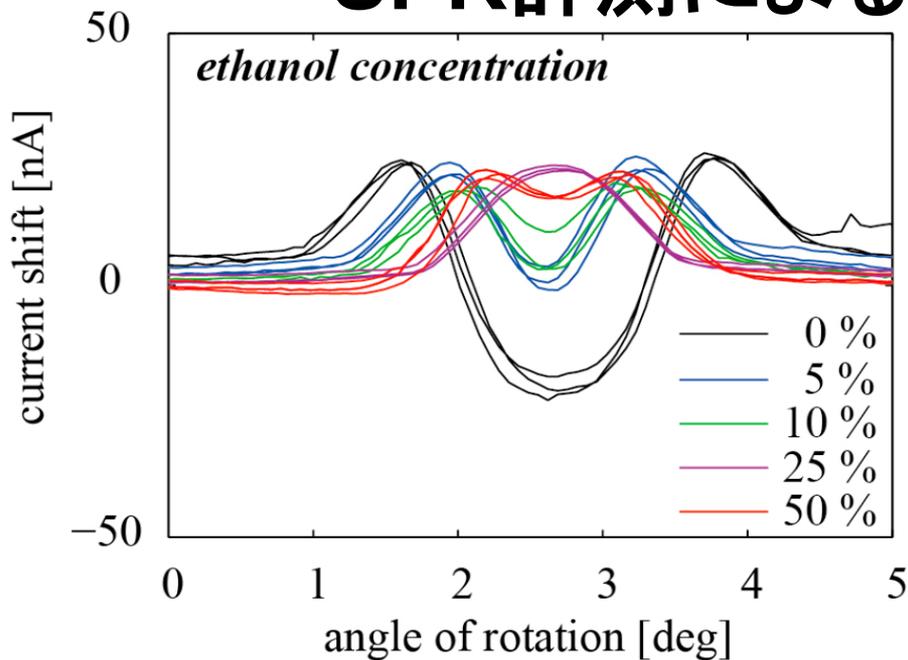
Height: 100 nm, Width: 1.75 μm
Pitch: 3.5 μm, Au thickness: 50 nm

SPR計測による化学量センシングの確認



T. Tsukagoshi, et al., Sensors, 2018.

SPR計測による化学量センシング

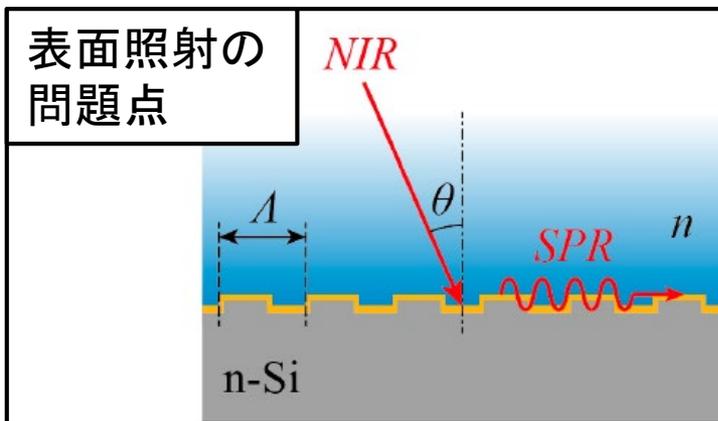


■ エタノール濃度に応じた屈折率変化で波形変化



■ 液体種に関わらず、屈折率変化に対して応答することを確認

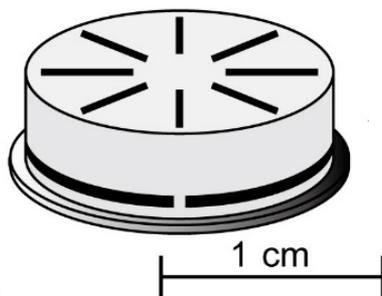
SPRセンサとして利用可能と確認完了



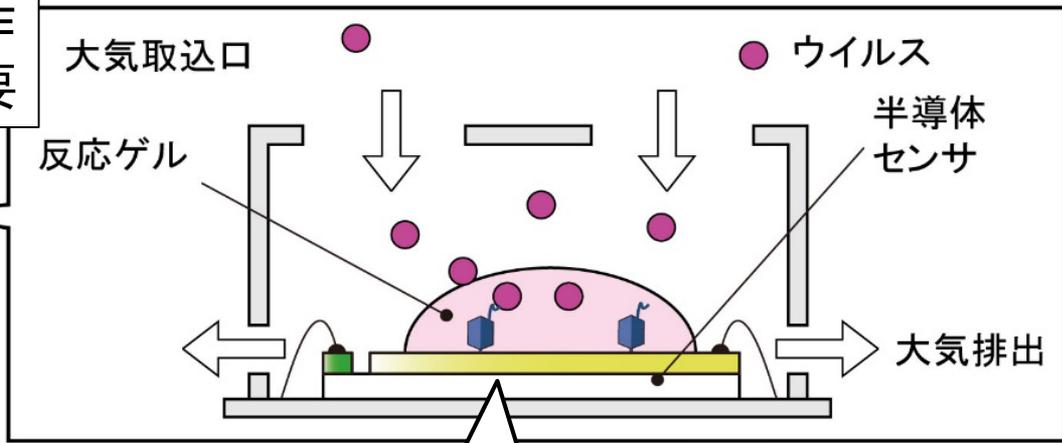
ただし試料内部を光が通る波面の乱れなどの懸念
基板側を通る背面照射型が望ましい

環境中の有害物質モニタ

装着可能小型
ウイルスセンサ



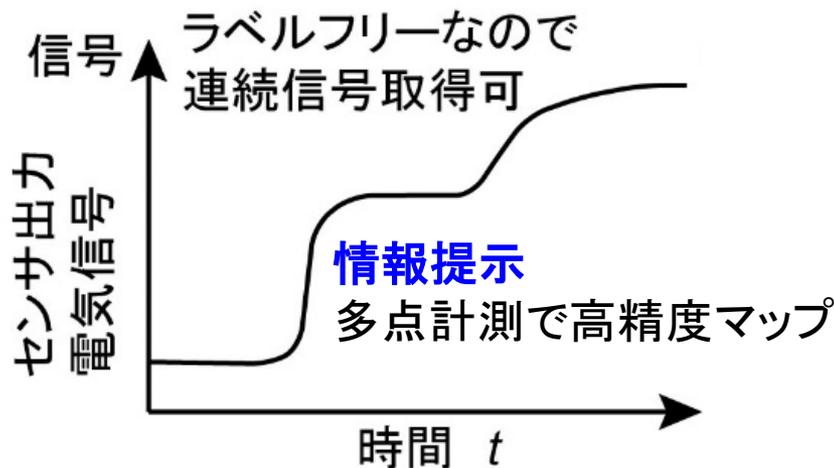
動作
概要



装着可能

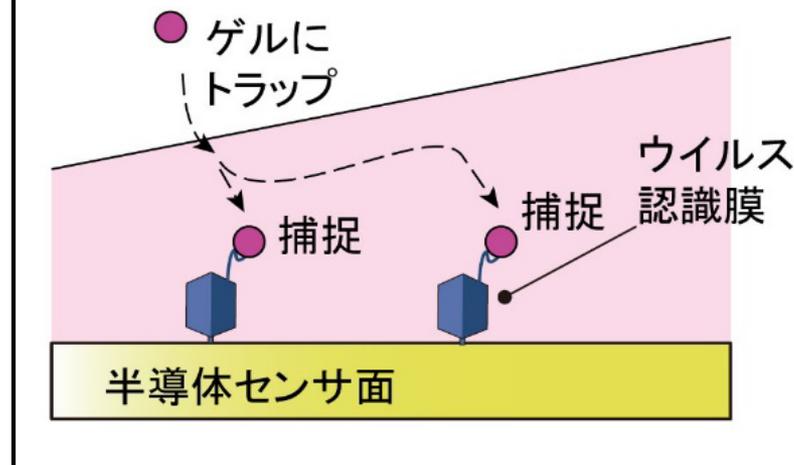
半導体で超小型・大量生産可能

SPRのメリット: 時系列データ



認識
詳細

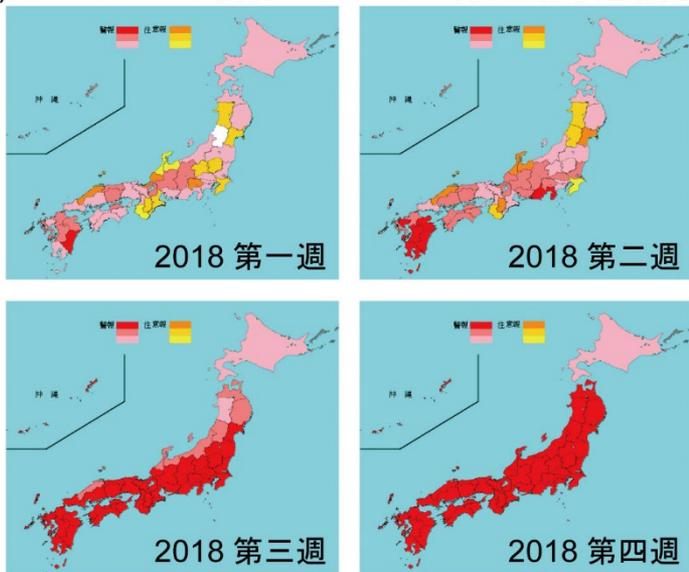
ウイルスや花粉など
環境中の化学物質を多点検出
可能な技術になるのでは?



これができるれば、ウイルスの空間分布モニタ

現状の検出法によるマップ化技術

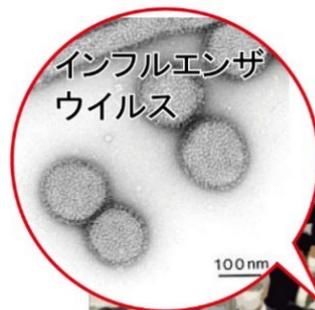
(b) インフルエンザ流行レベルマップ (国立感染症研究所)



現状のインフルエンザ流行マップ
分解能は**県単位**、更新は**週ごと**

- 分布を**連続リアルタイム高分解マッピング**
- 従来不可能な**迅速・ピンポイント**さで対策可能

JST A-STEP 産学協同(育成型)
「半導体SPRセンサによるコロナウイルスのリアルタイム分布可視化技術開発」2021~採択
実用化にご興味のあるパートナーをさがしています

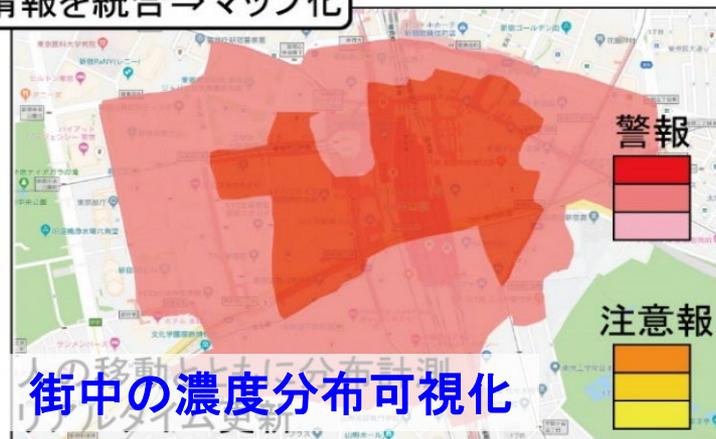


リアルタイムでウイルス検出
小型可搬センサを研究開発



情報を統合⇒マップ化

統合

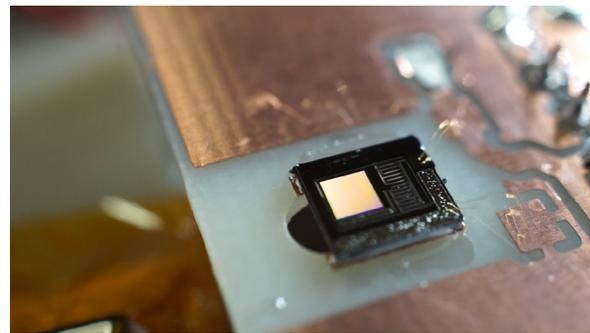
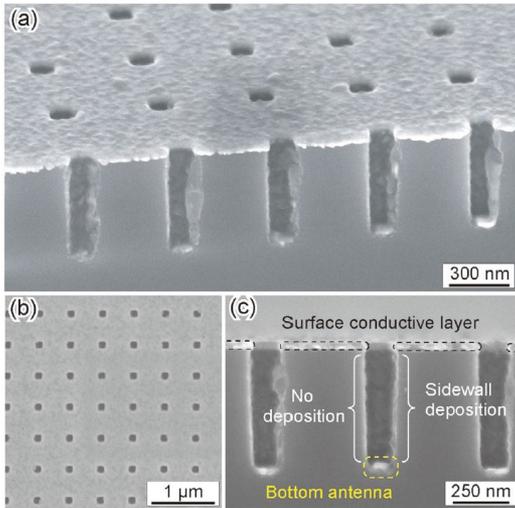


街中の濃度分布可視化

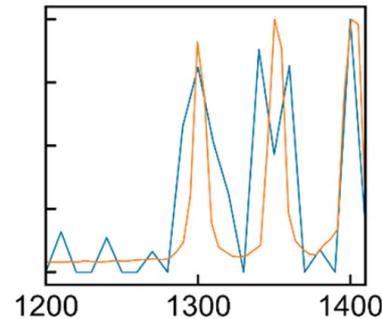
想定される用途

赤外検出器のポイント

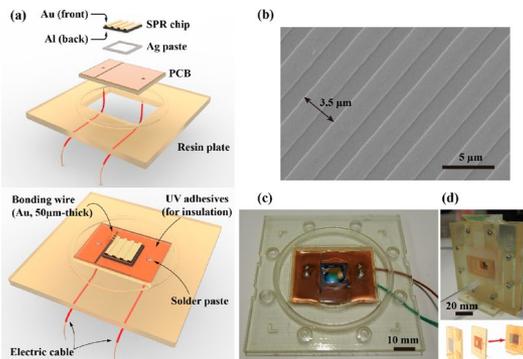
- シリコン製なので安価
- 小形な分光器への展開も可能



(c) $\lambda = 1300, 1350, 1400$ [nm]



近赤外
分光器
MEMS
で構成可能



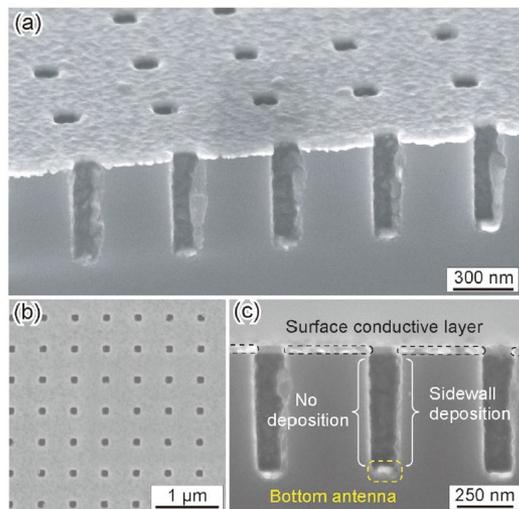
ウイルスセンサのポイント

- ラベルフリーで計測可能
- ウイルスのみならず、一般的な化学量のスクリーニングに利用可能なシーズ技術

実用化に向けた課題

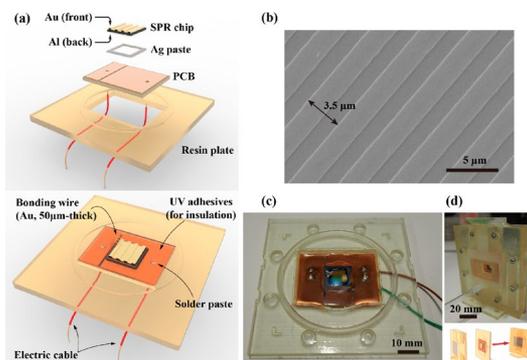
赤外検出器の課題

- 近赤外～中赤外において、検出技術を確認しているが、単画素
- アレイ化の場合、読み出し回路の検討が必要



ウイルスセンサの課題

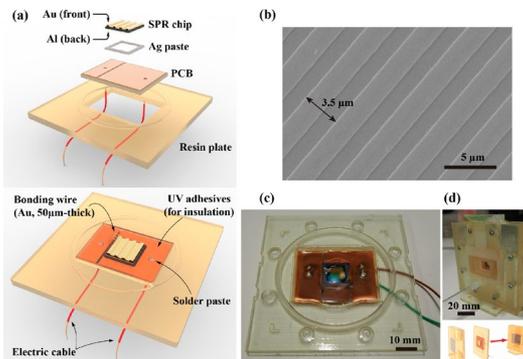
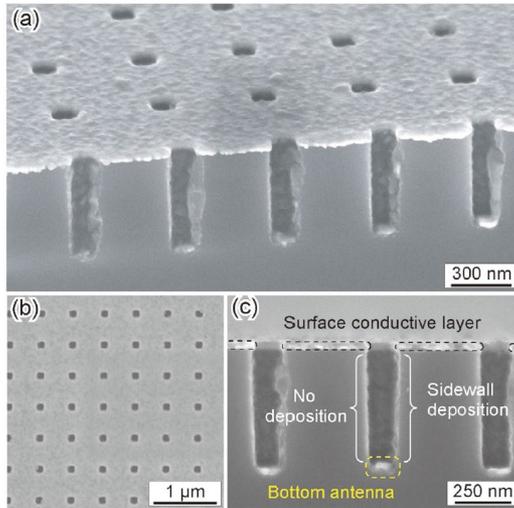
- A-STEP 育成型、本年度中にデバイスの実用可能性見極め
- 半導体ライン上での試作検討
- 集塵機構など、周辺部分を含めたセンサ設計が今後の課題



企業への期待

赤外検出器について

- 赤外検出器・分光器に関して独自デバイス開発のシーズ技術は有しているが、応用面について知見が少ない
- デバイスの応用ニーズ・シーンのご提案を期待しています



ウイルスセンサの課題

- パートナーを探している
- 製造パートナー
- 空気清浄機など、ユーザーのパートナー

本技術に関する知的財産権

発明の名称 : 赤外線検出素子およびその製造方法
出願番号 : 特願2019-106235
出願人 : 東京大学、電気通信大学
発明者 : 下山勲、高畑智之、塚越拓哉、高橋英俊、
安永竣、菅哲朗

これ以外に、光検出器に関して、S/Nを高める機構の出願を現在準備中です

お問い合わせ先

国立大学法人電気通信大学
産学官連携センター
産学官連携ワンストップサービス

TEL 042-443-5871

FAX 042-443-5725

e-mail onestop@sangaku.uec.ac.jp