

半導体で構成する小型化可能な 表面プラズモン共鳴化学量センサ

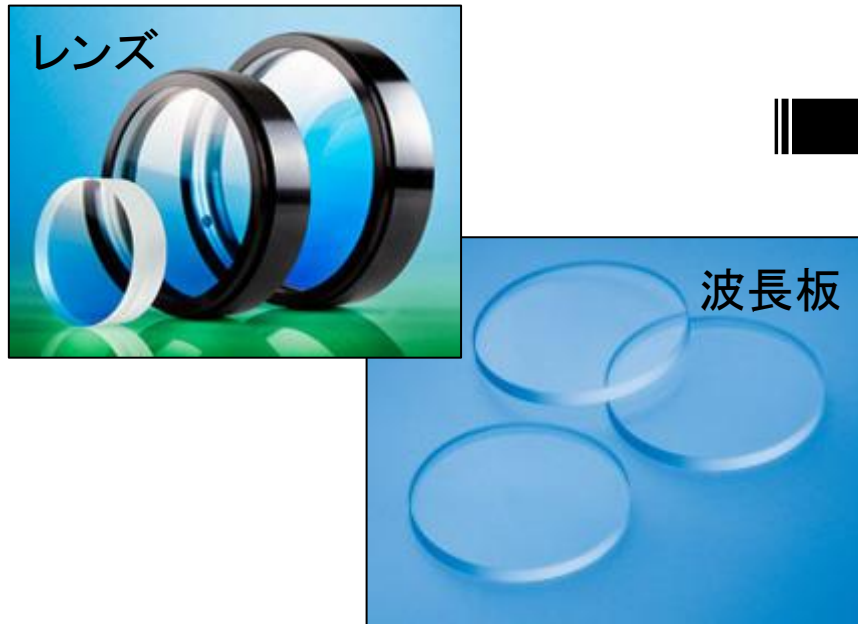
電気通信大学大学院情報理工学研究科
機械知能システム学専攻
教授 菅 哲朗



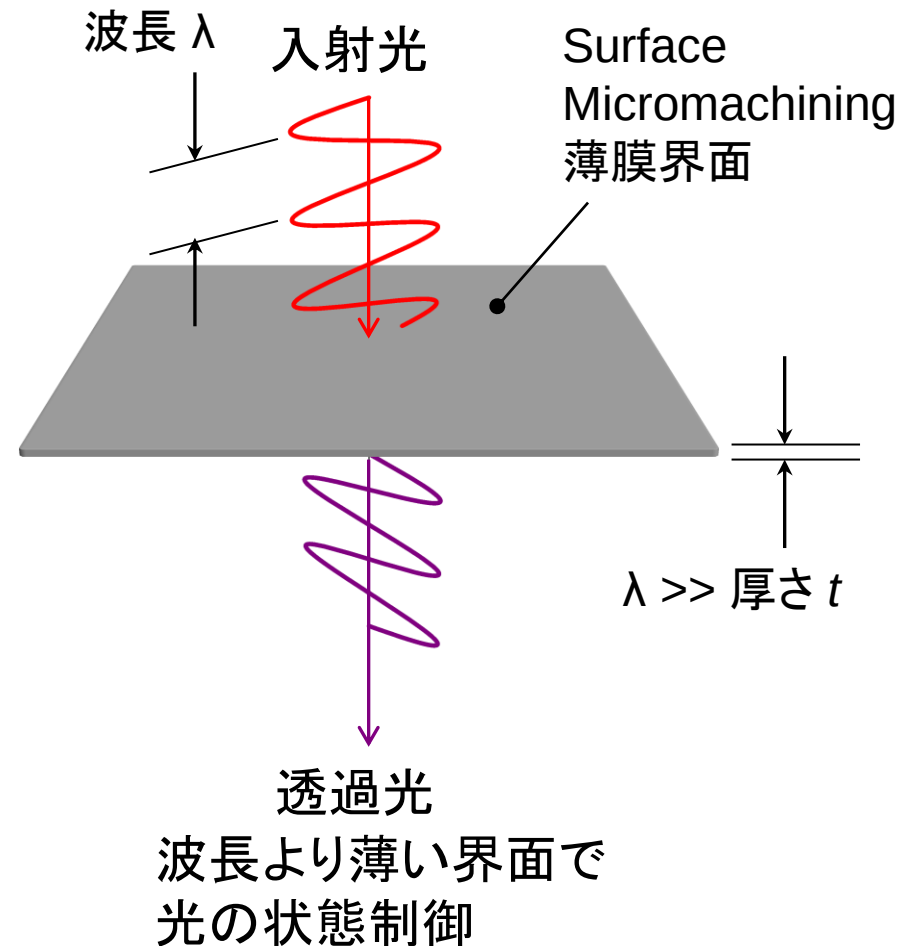
自己紹介: MEMS薄膜構造を利用した光の操作

■ 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

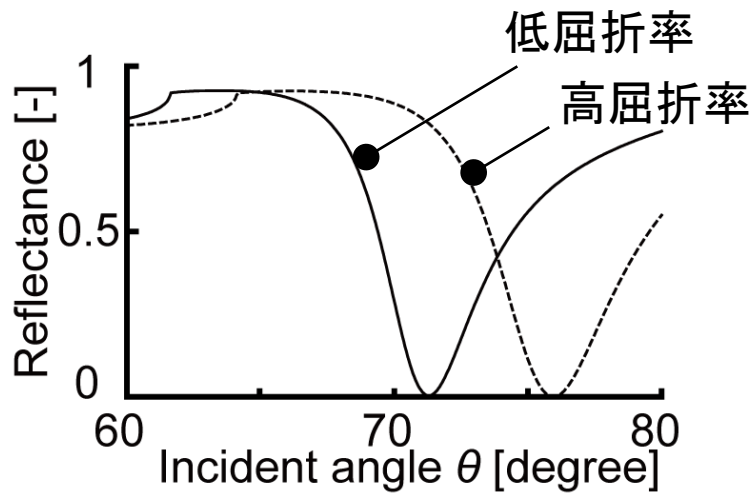
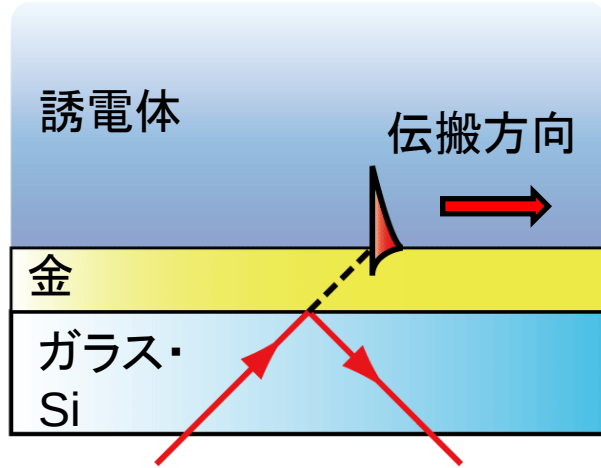


通常、波長よりも大きな
バルク構造で光状態制御
コンパクト・機能集積光学デバイス
ロボットのビジョンなどの出口を狙う



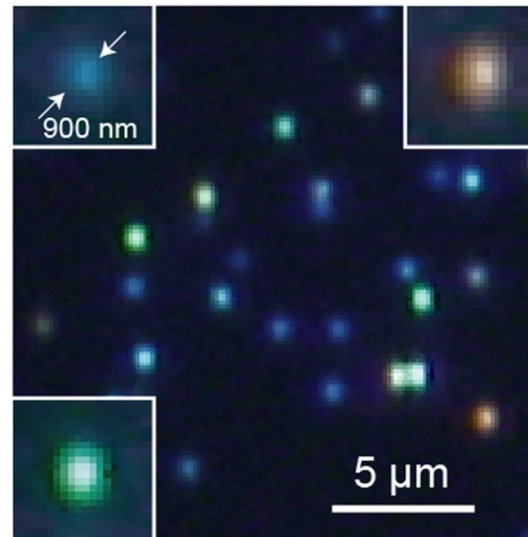
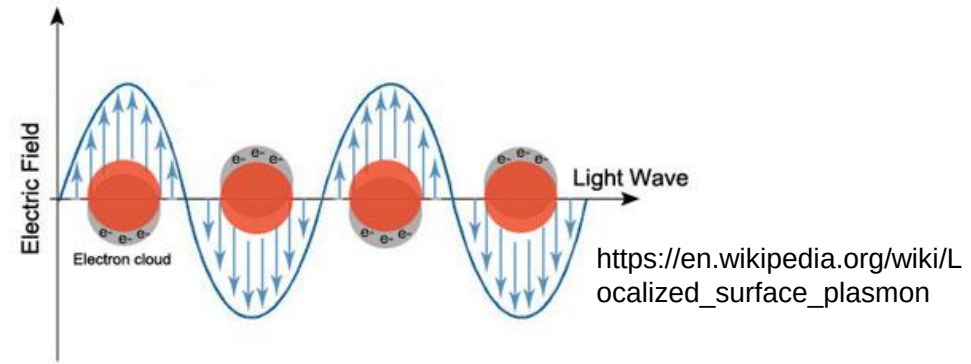
表面プラズモン共鳴に着目

■ 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)

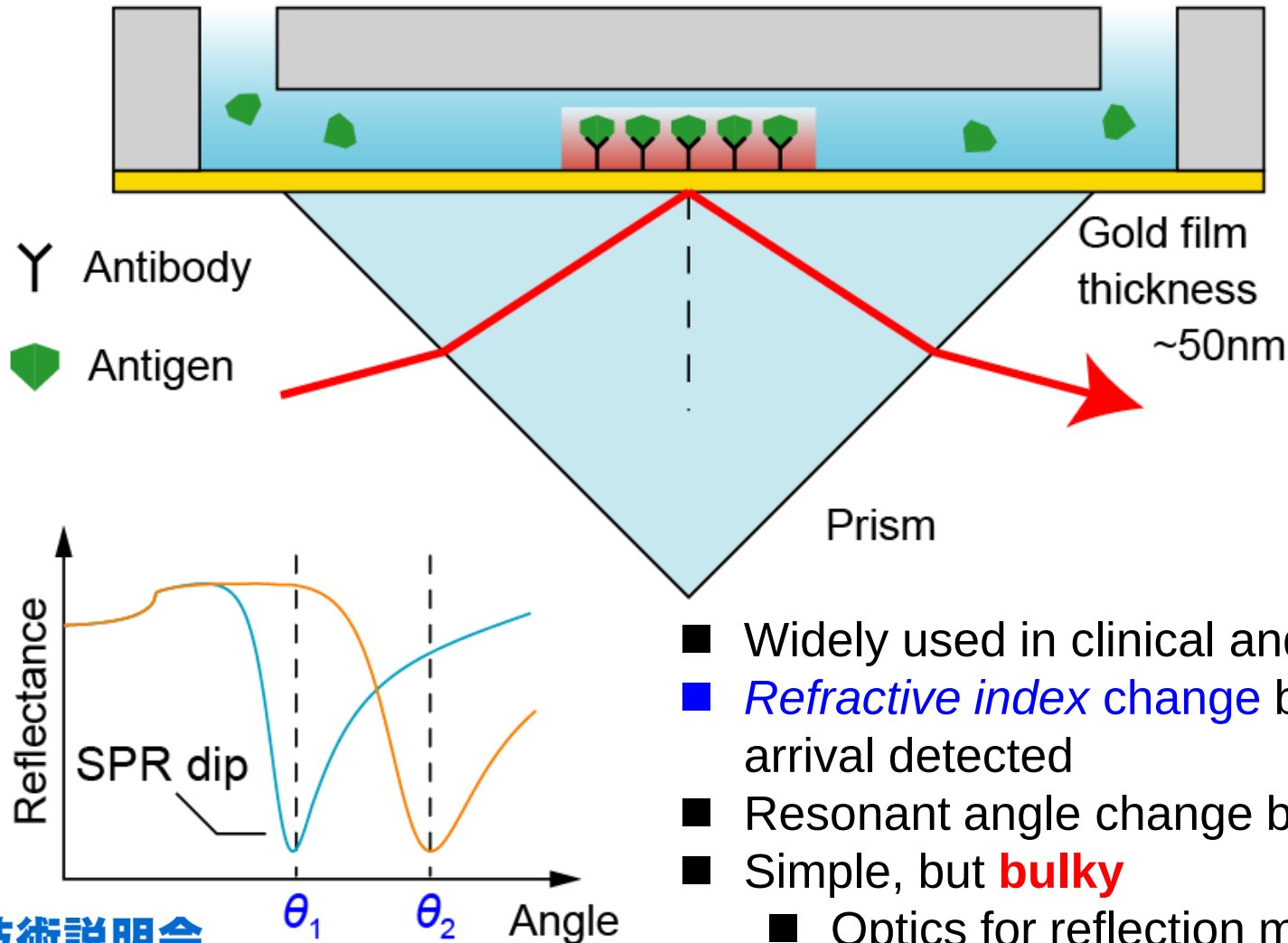


銀ナノ粒子の
散乱光の
暗視野像

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型化学量センサ



新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

従来技術とその問題点

既存技術 (GE (Healthcare) 社
Biacore™)



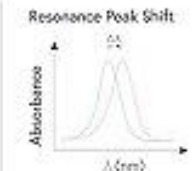
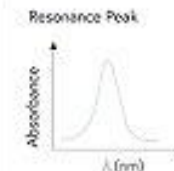
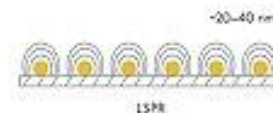
市販大型SPR装置
高感度 (約 1 pg/mm^2) だが
可搬性に乏しい

既存技術 (NICOYA (LIFESCIENCES) 社
OpenSPR™2)



Nicoya LSPR Technology

Localized Surface Plasmon
Resonance (LSPR)

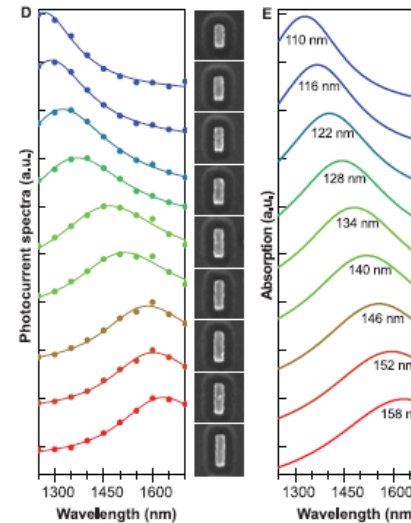
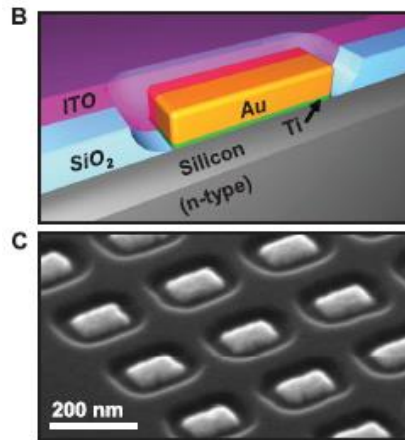


小型化は図られているが
検出には光学系が必要

新技術説明会 表面プラズモン共鳴を電氣的検出

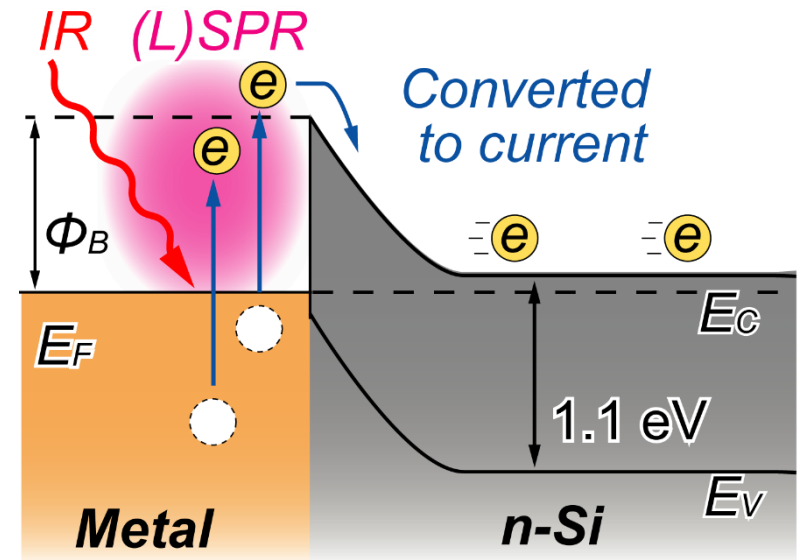
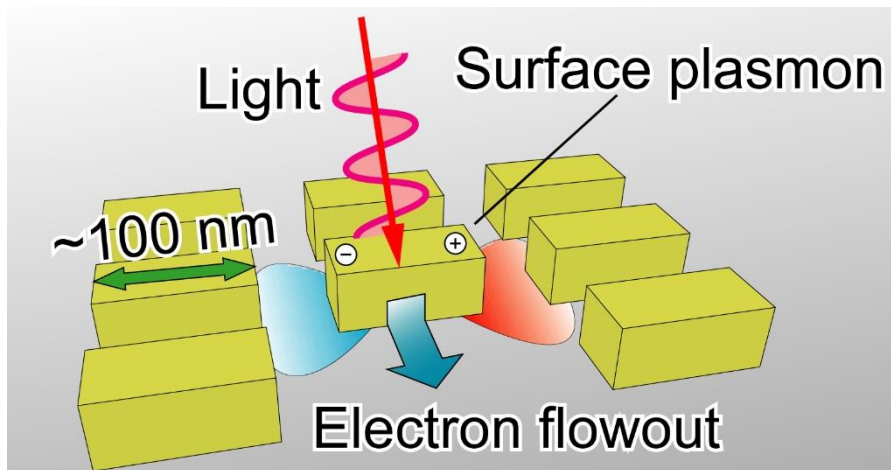
先行研究

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

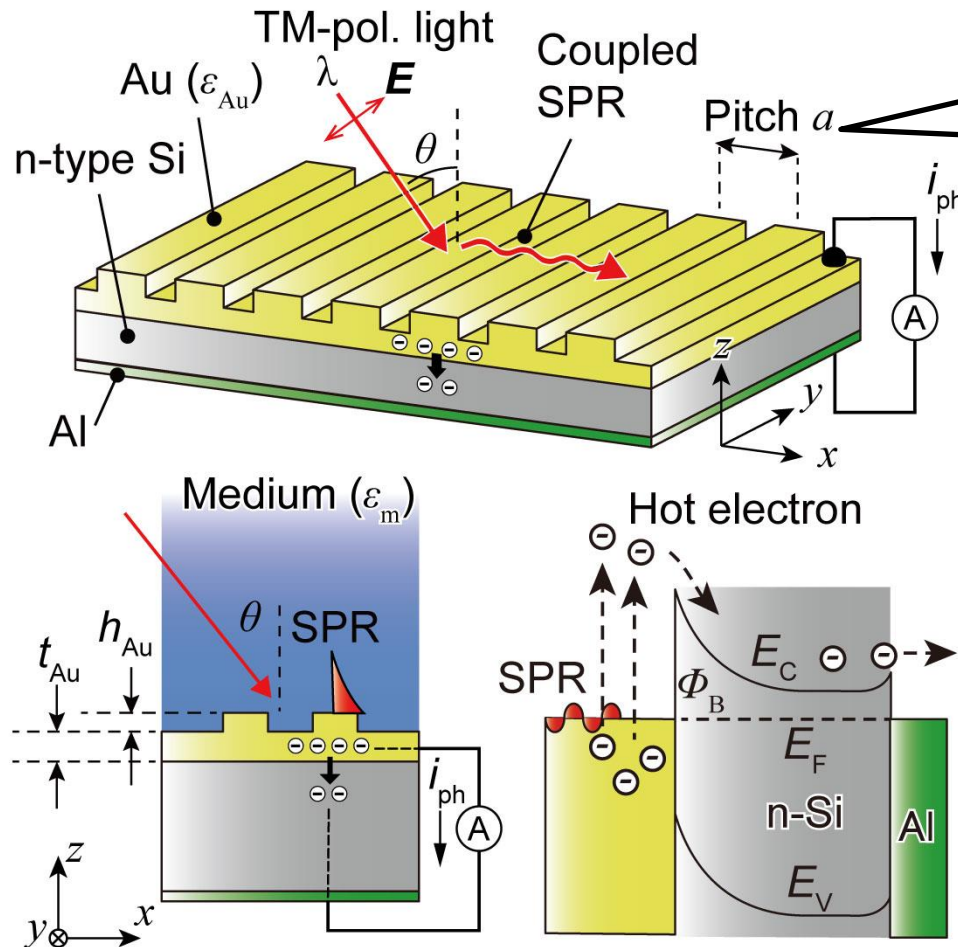
光の検出の原理詳細



表面プラズモン共鳴を光学によらず電氣的に検出可能

電気検出を利用したSPRセンサ

SPRの電流検出を利用した小型ワンチップ型SPRセンサ



入射光によるSPR励起条件

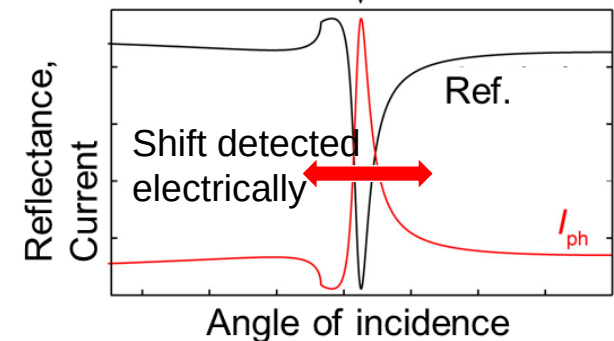
$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n_{\text{Si}} \sin \theta + \frac{2m\pi}{a} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m + \epsilon_{\text{Au}}}{\epsilon_m \epsilon_{\text{Au}}}}$$

光学的に小型化有利な、垂直入射配置も可能



SPR detected by I_{ph} peak

SPR point



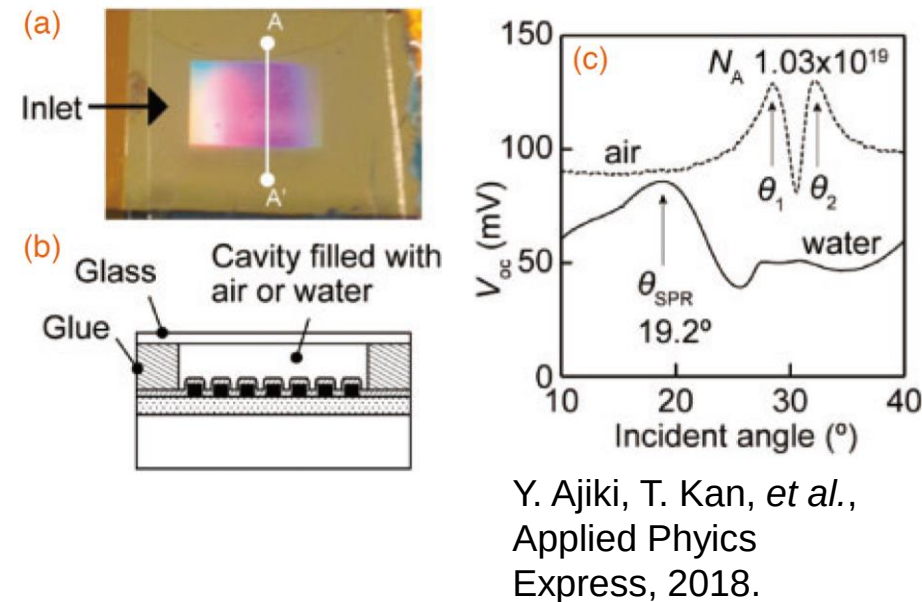
Y. Saito, et al., Applied Physics Express, 2020

Y. Saito, et al., Optics Express, 2019.

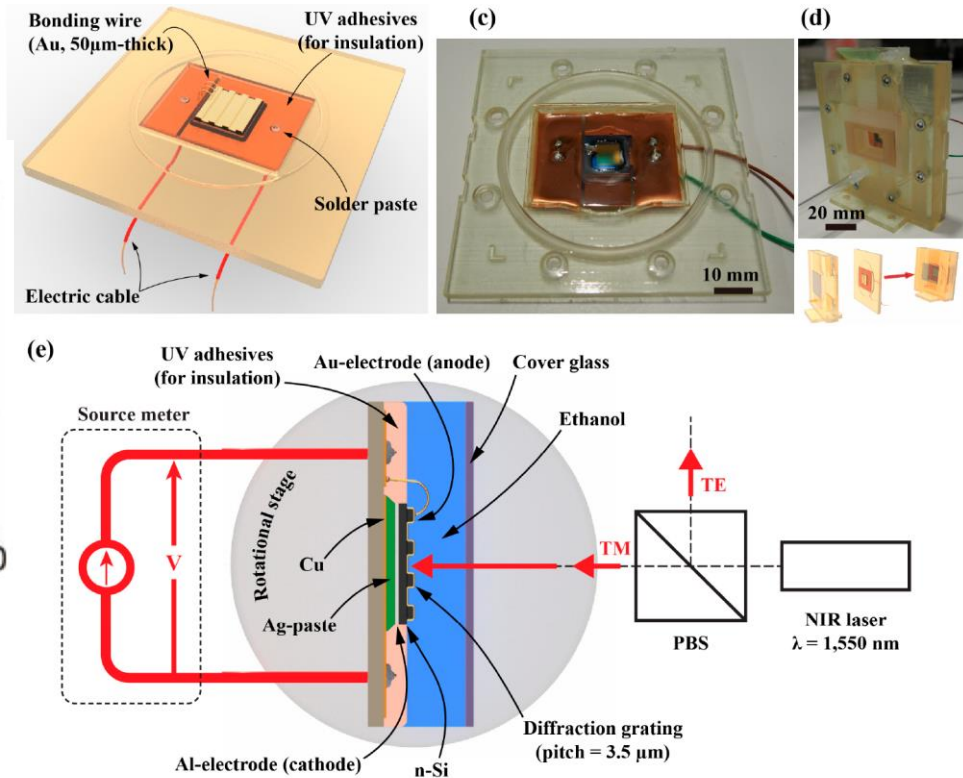
実際は、角度・波長固定で強度変化を測定で小型化想定 7/21

これまでのグループ内の研究

Previous researches in our group



Si上にレジスト凹凸で格子を製作
溶液を満たした状態での計測は実施
ただし、屈折率分解能測定は未了



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

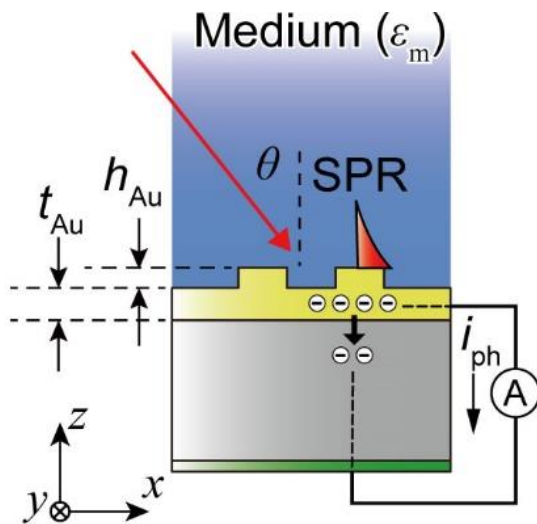
サンプルの屈折率変化は測定可能
ただし、共鳴状態が明瞭ではない

光学的デザインの最適化が必要

要求仕様: 水の吸収が無視できる可視光領域での最適設計

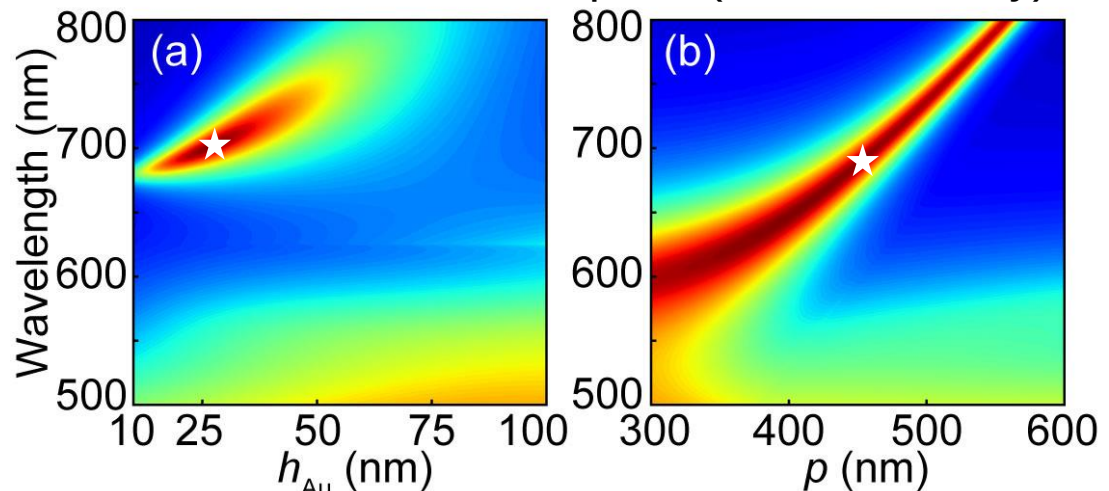
光学シミュレーション

Rigorously coupled
wave analysis (RCWA) 計算
による周期構造計算

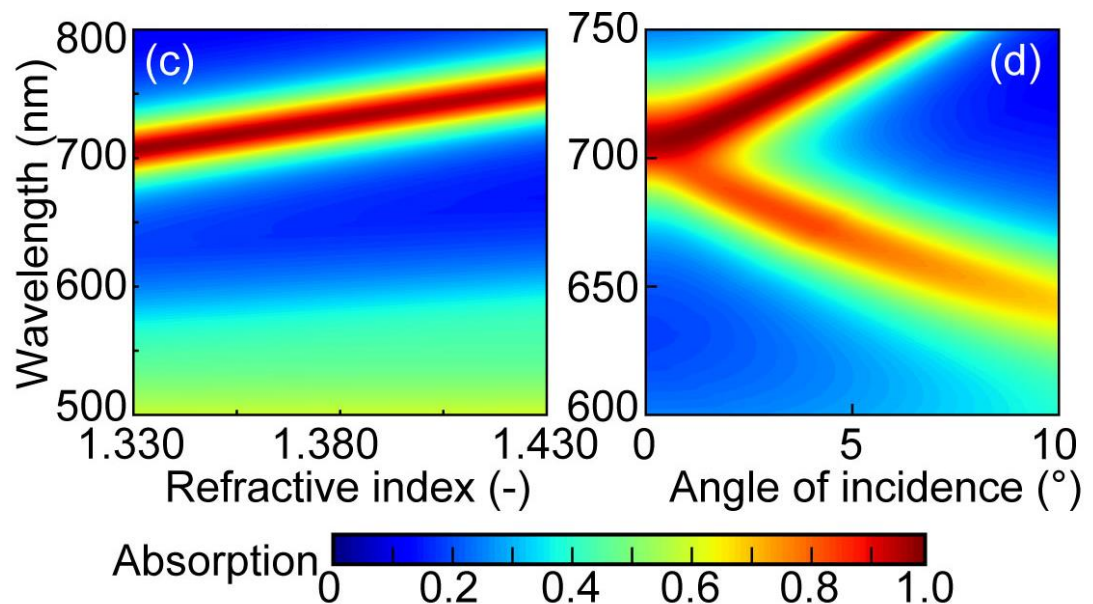


化学量センサとしての有用性検証
SPR共鳴点が試料面の屈折率変化によるシフト
⇒ 化学物質付着を測定可能
SPRセンサの応用可能性を確認

Device dimension & Absorption (SPR efficiency)

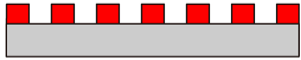


Good parameter: $h_{Au} = 30$ nm, pitch = 470 nm



半導体加工

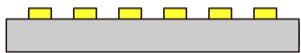
① EB lithography



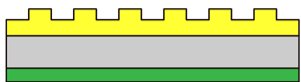
② Au evaporation



③ Lift-off



④ Au, Al evap.

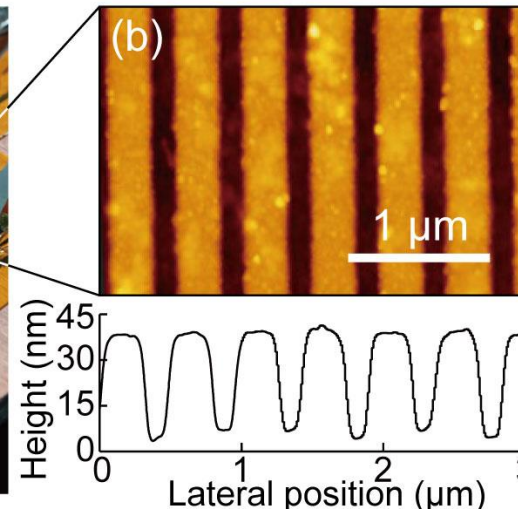
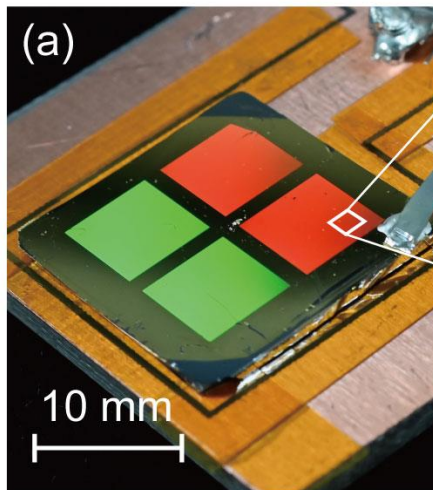
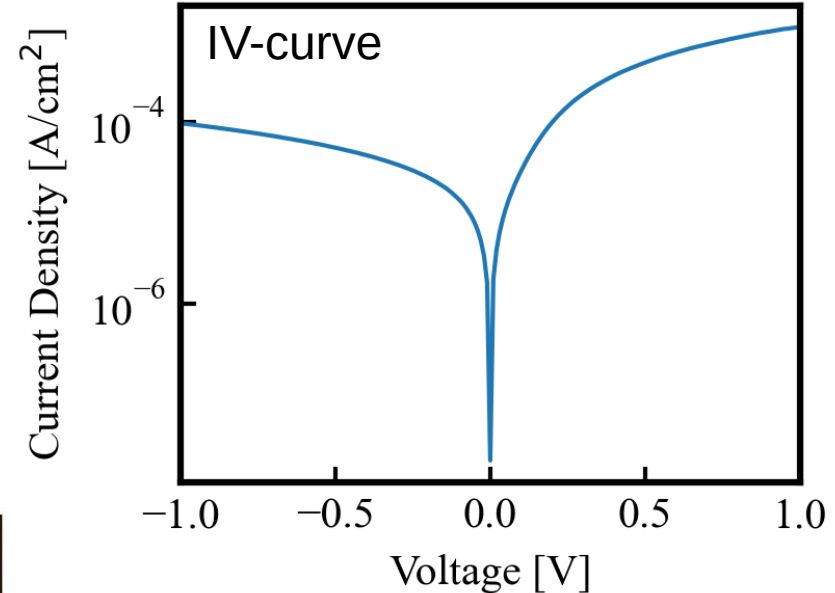


■ Photoresist ■ Au
■ N-Si ■ Al

30-nm grating by the lift-off metal thickness

Grating pitch 470 nm
 h_{Au} 30 nm, t_{Al} 100 nm

電気的特性評価



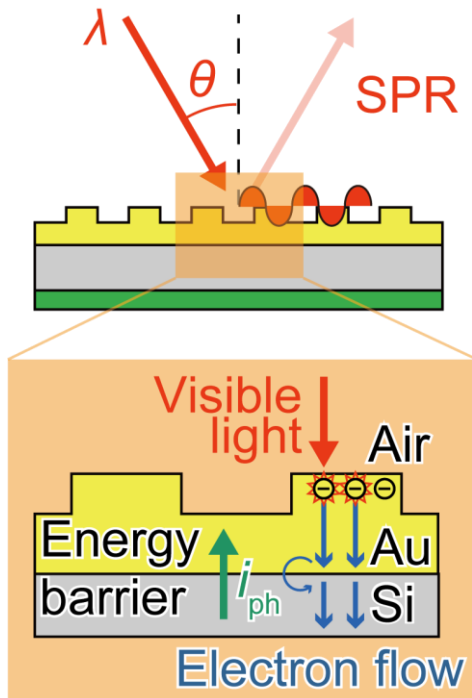
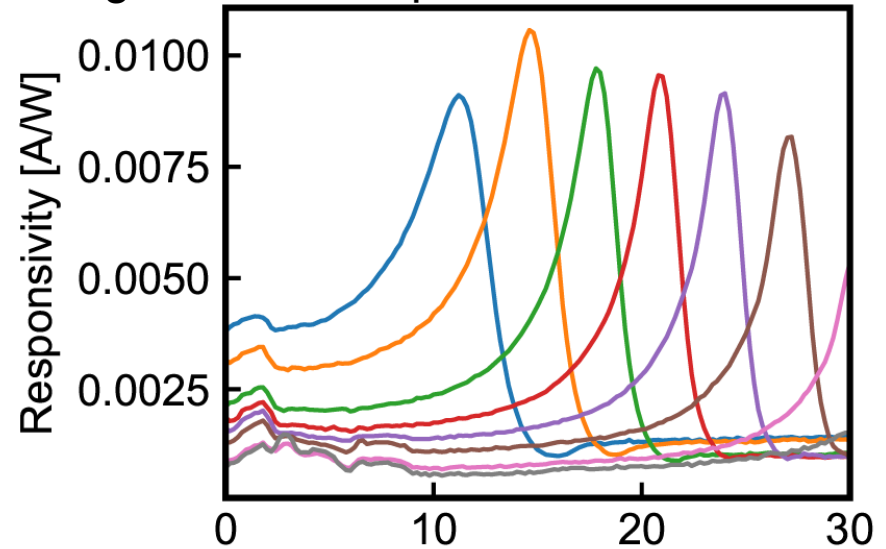
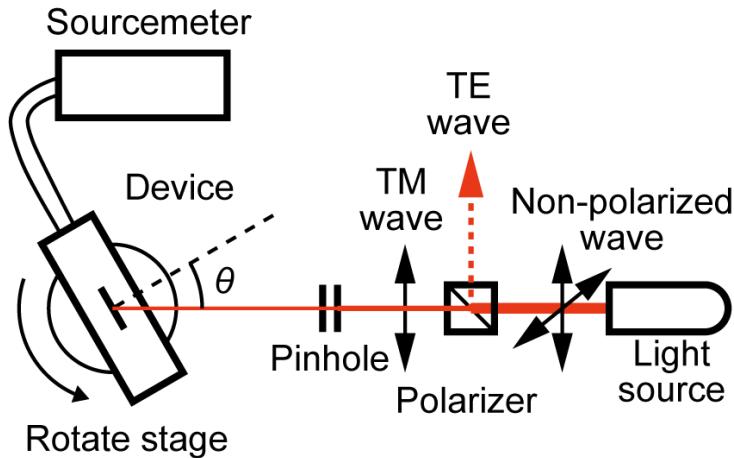
ショットキー障壁高さ

$\phi_B = 0.72 \text{ eV}$

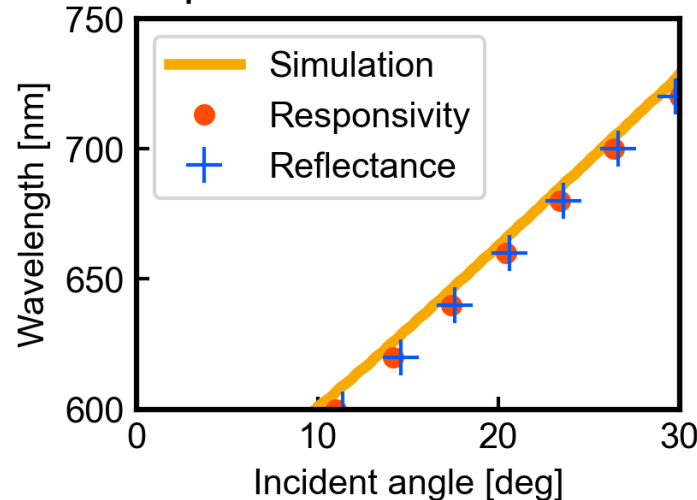
可視光から近赤外までの
検出が可能になる

試料面が空気の場合の結果

Angular current spectrum for different λ



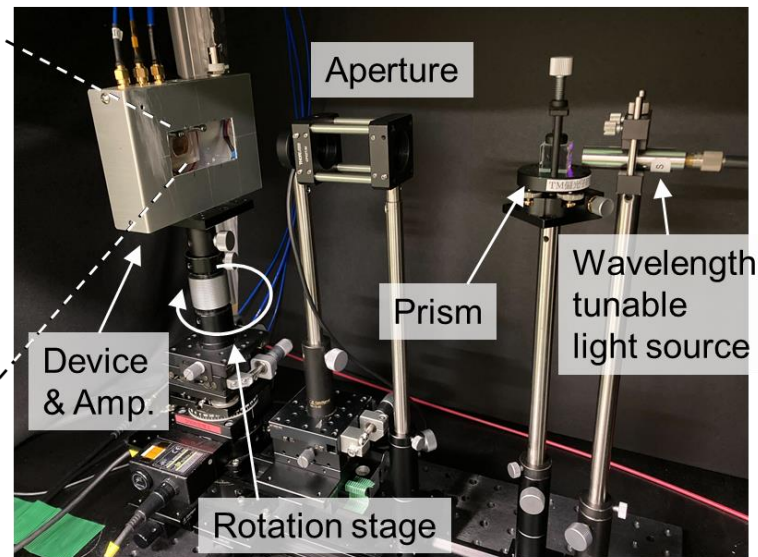
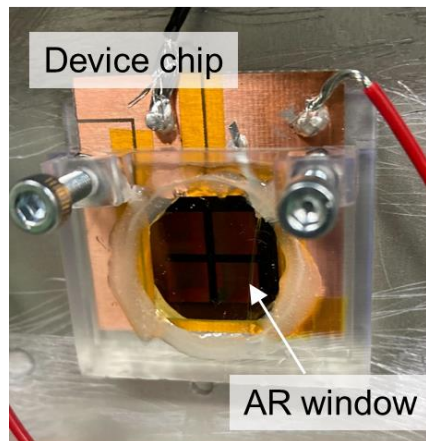
Peak position



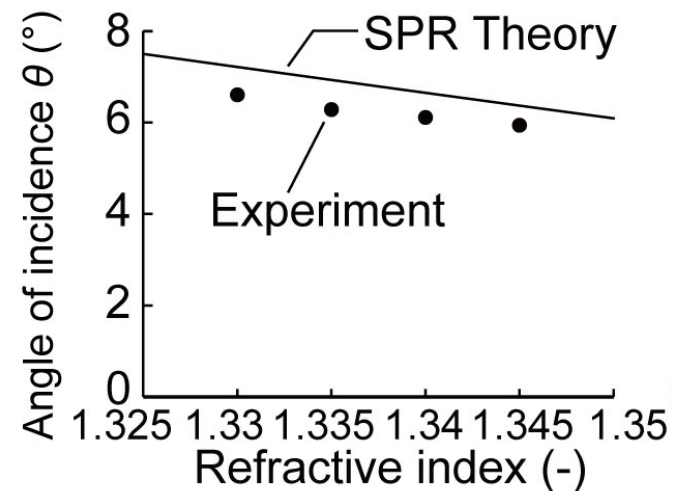
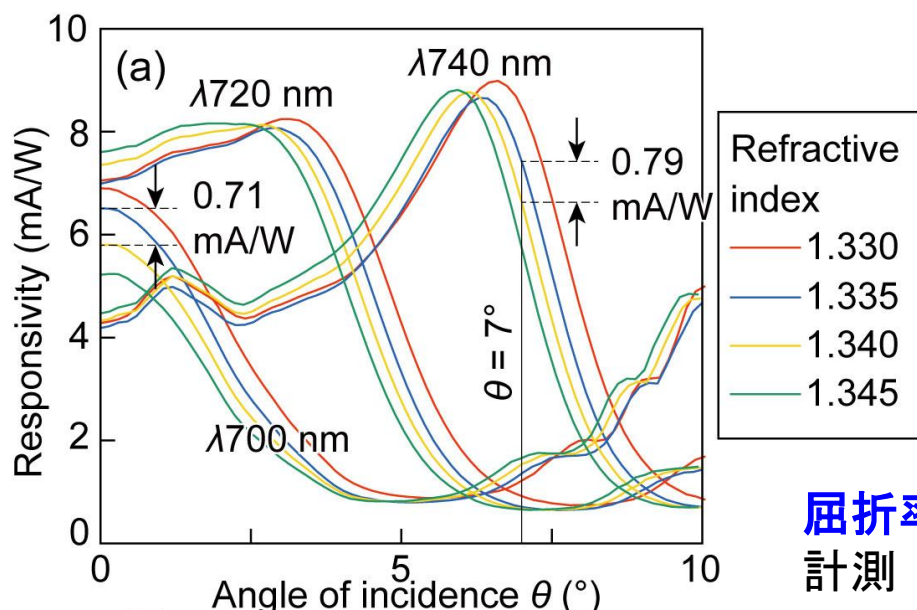
SPR共鳴は**計算結果**
と良好な整合を見せた

SPR共鳴状態を
電氣的に測定可能
であることを確認

試料面に液体を用いた測定



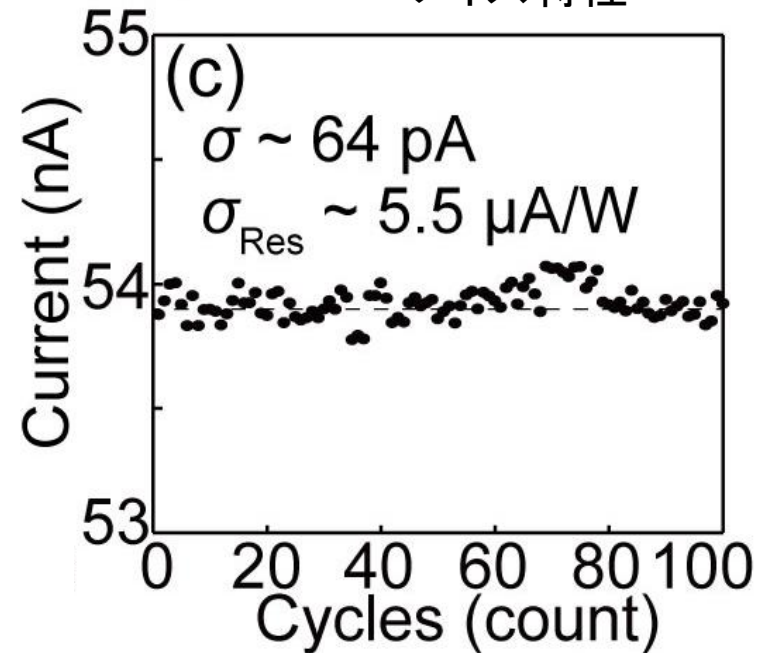
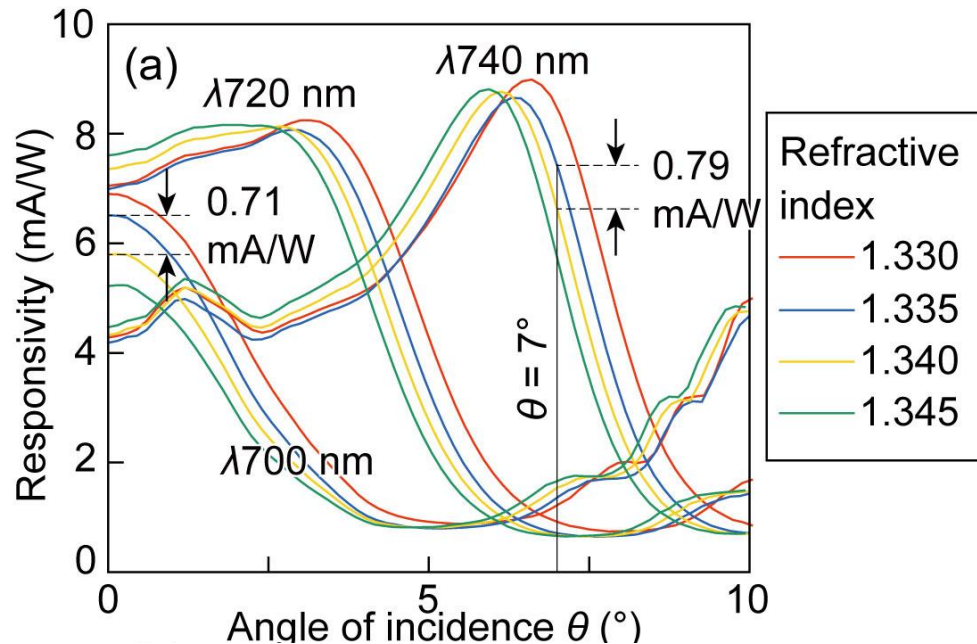
今回は予備的な検証段階なので
素子全体を溶液プールに入れて測定



屈折率変化による明瞭なSPR共鳴点シフトを
計測

測定可能屈折率レゾリューション

アイドル状態の
ノイズ特性



応答は単位屈折率 (RIU) 変化に対して
 $0.79 \text{ mA/W} / 0.005 \text{ RIU} \Rightarrow \mathbf{0.158 \text{ A/W/RIU}}$

入射角度と照射波長を固定して測定したと考える

ノイズと同じレベルの信号をもたらす屈折率変化を分解能と考える

$\Delta N = \mathbf{3.4 \times 10^{-5} \text{ RIU}}$ (refractive index unit) @ $\theta = 7^\circ$

$\Delta N = \mathbf{4.0 \times 10^{-5} \text{ RIU}}$ @ $\theta = 0^\circ$

ベンチマーク

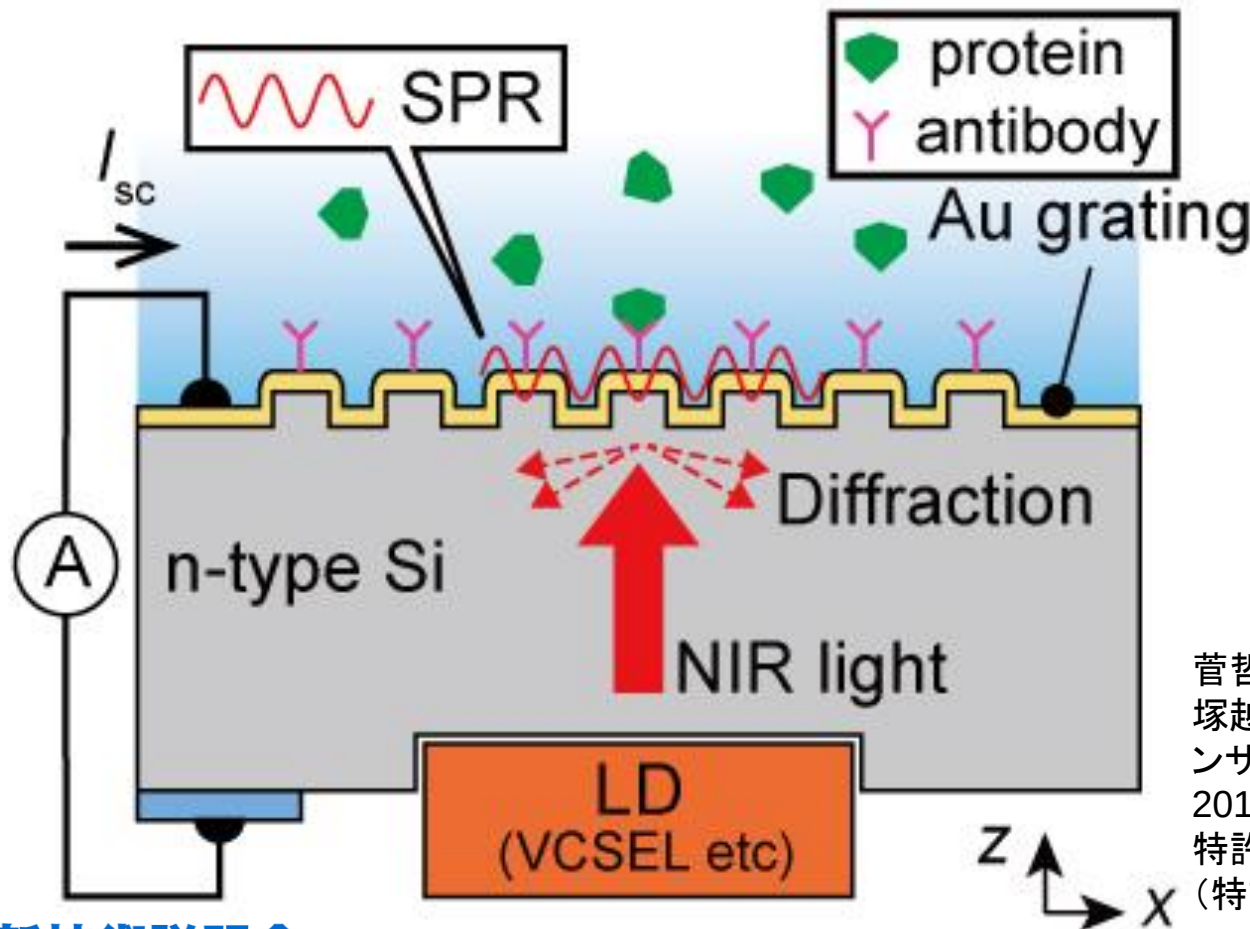
RIU resolution compared with recent publications

Authors	Type	Resolution	Bibliography
X.L. Zhou, <i>et al.</i>	Prism	3.7×10^{-6} RIU	Optics communications 2017
Z.C. Liu, <i>et al.</i>	Prism	2.2×10^{-7} RIU	Sensors 2020
D.F. Santos, <i>et al.</i>	Optical fiber	9.8×10^{-6} RIU	IEEE sensors journal 2015
A. K. Pathak and V. K. Singh	Optical fiber	1.073×10^{-5} RIU	IEEE photonics technology research 2020
T. Khanikar and V. K. Singh	Grating and optical fiber	1.31×10^{-5} RIU	Optical and Quantum Electronics 2019
L. Wen, <i>et al.</i>	Grating and semiconductor (NIR)	8×10^{-6} RIU	ACS nano 2019
This work	Grating and semiconductor (Visible)	3.4×10^{-5} RIU	IEEE sensors journal (accepted)

提案するセンサは **実用レベルの分解能**を持つことを確認

新技術がもたらすもの：光学系ゼロのチップセンサ

- 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

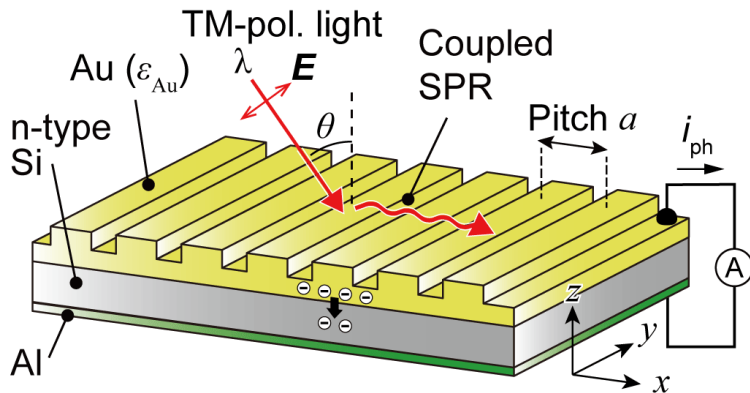


小型ワンチップ化
が可能な技術

半導体デバイス
完成にめど
タンパク質分子
測定で機能実証中

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
特許6928931 (2021/08/12)
(特許登録: 大学単独)

想定される用途



タンパク質などの検出

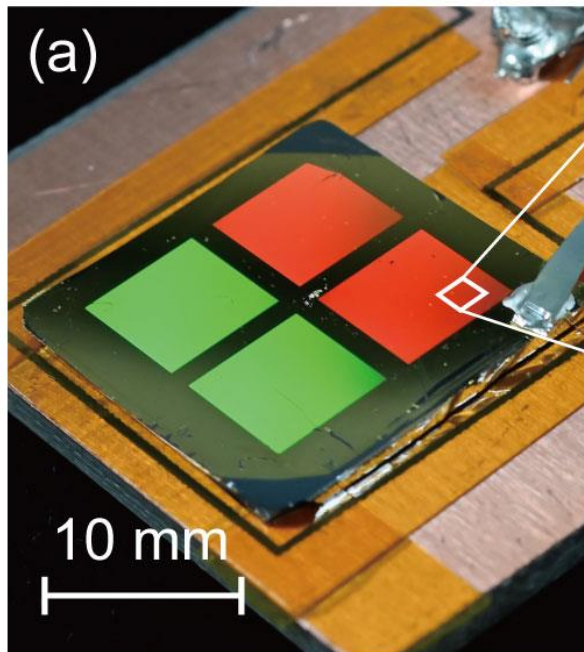
- 従来型イムノアッセイセンサの代替、定量性、感度向上
- ヘルスケア用途へ展開可能

ウイルスセンサなど環境モニタ

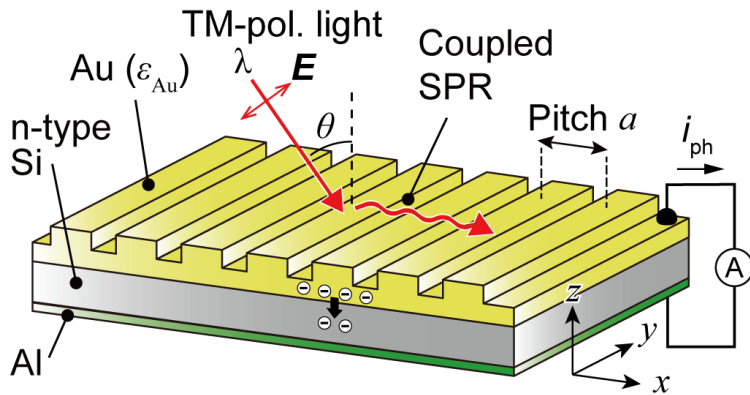
- ラベルフリー計測可能
- ウイルスなどを空気捕集して室内の空気の質をモニタ

食品生産などのモニタ

- 小型なので生産ラインに組み込み可能
- 味のばらつきなどを定量化

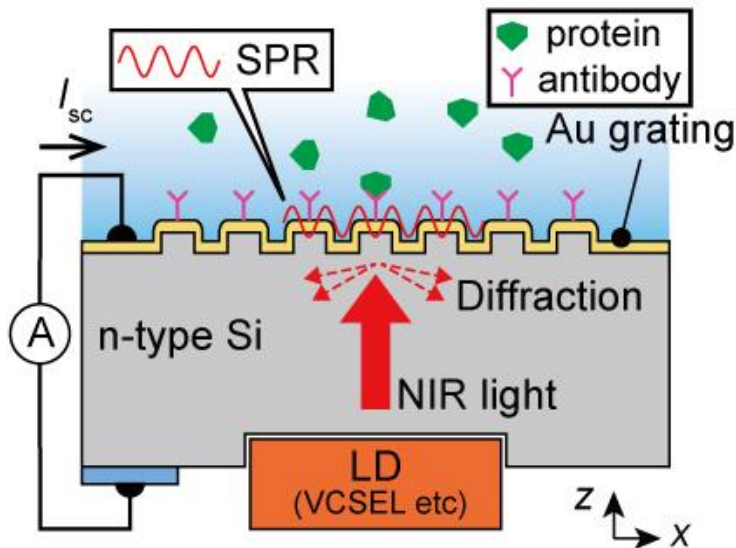


実用化に向けた課題



生体分子計測で機能実証

- 現在、半導体センサの技術が確立した段階
- 具体的なタンパク質検出で化学量センサとしての性能を検証



精度向上

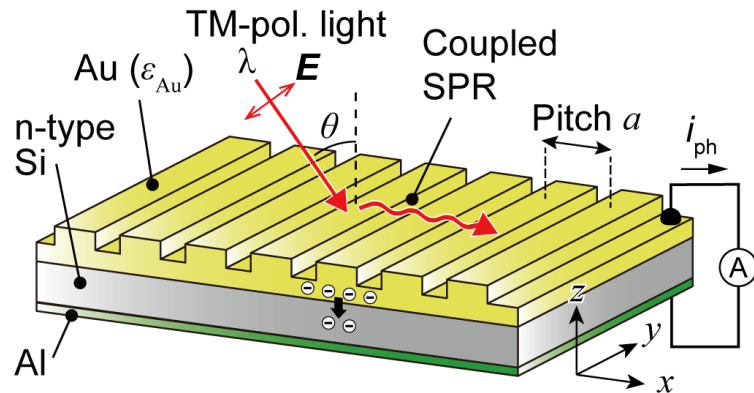
- 液体側からの光照射⇒試料と相互作用しない背面照射構造検証
- 半導体電流検出構造の最適化
SN向上を進めて分解能2桁アップ
目標、大型SPRと同等の機能

システム化

- 光源、流路などとの融合による
トータルでのシステム化

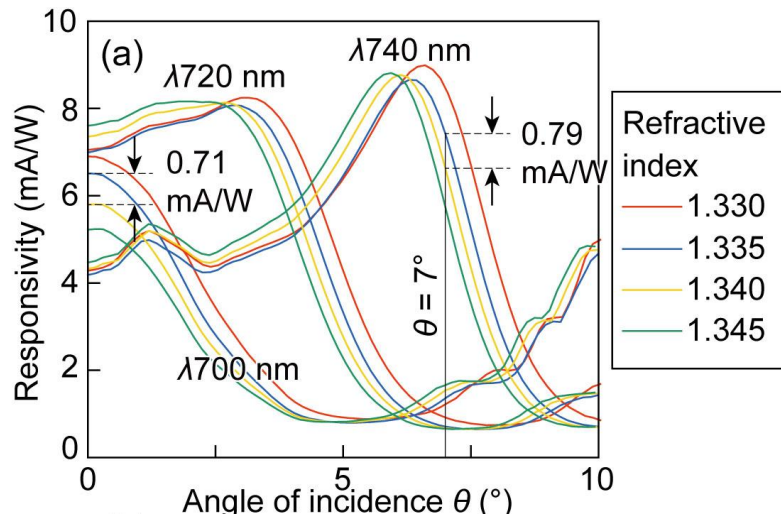
企業への期待

新技術説明会 New Technology Presentation Meetings!



化学量センサとしての展開

- 化学量センサ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



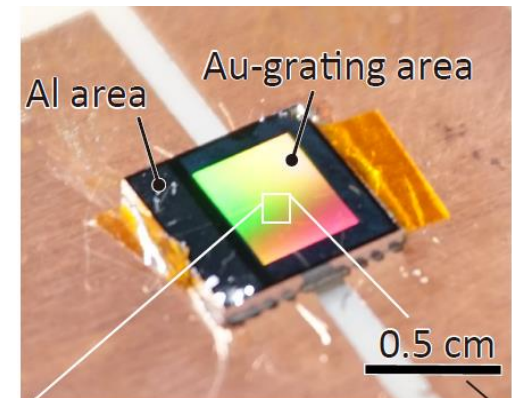
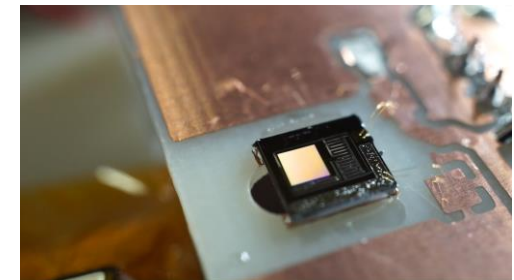
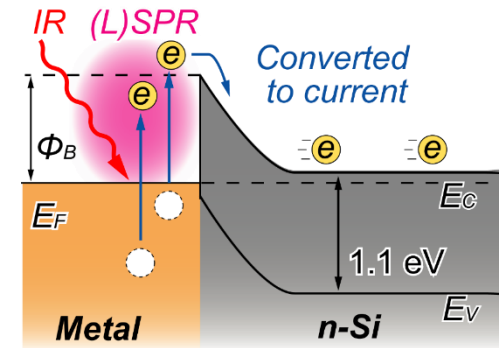
化学量センサの生産に関する課題

- パートナーを探している
 - 製造パートナー
 - 空気清浄機など応用面におけるユーザーのパートナー

新技術説明会 New Technology Presentation Meetings!

まとめと結論

- キーテクノロジー: **表面プラズモン共鳴**をショットキー障壁を利用して**電氣的検出**
- マイクロ/ナノサイズの回折格子により**任意の入射角度での光路設計**可能
⇒実質的に**ワンチップ化**可能
- 化学量センサとしての展開一歩手前
半導体センサ技術は基礎確立完了
タンパク質などの検出を通じて
今後、化学量センサとしての実用性を評価
- **LSIやMEMSと組み合わせる**ことができる
多様な応用が可能
 - Ex. ピクセル化して大規模スクリーニング機能を
てのひらサイズに



ご清聴ありがとうございました

本技術に関する知的財産権

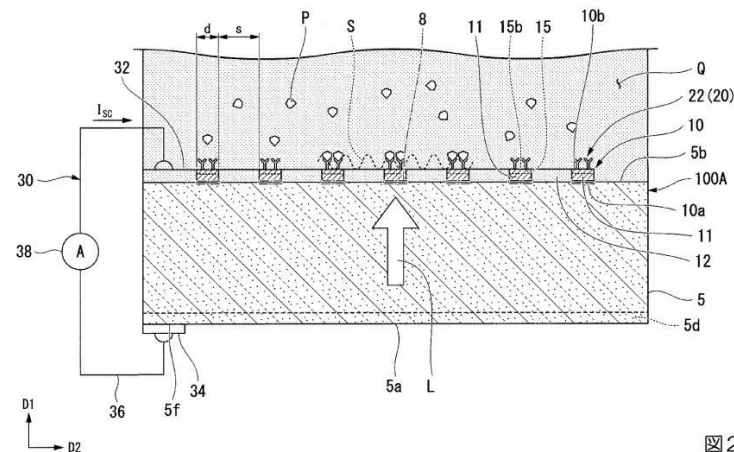
発明の名称 : 計測用デバイス及び計測センサ

出願番号 : 出願番号 2017-092710

登録番号 : 特許6928931(2021/08/12)

出願人 : 東京大学、電気通信大学

発明者 : 菅哲朗, 石原拓哉, 下山勲, 野田堅太郎, 塚越拓哉



これ以外に、同じ原理に基づいた赤外光検出器・分光器に関して、S/Nを高める機構の出願を行っています

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 042-443-5726

e-mail

onestop@sangaku.uec.ac.jp