

# 表面プラズモンアンテナ付き フォトダイオードによる屈折率測定

研究者：静岡大学 電子工学研究所  
教授 猪川 洋、助教 佐藤 弘明

説明者：猪川 洋

# 開発の経緯

## • SOI LSIの普及

- 部分空乏型(ハイエンドMPU、ゲーム機)
- 完全空乏型(22 nm世代以降にも対応)
  - 光検出器はLSIに新たな機能を付与
  - 課題: 薄いSOIの光吸収効率は極めて低い

## • 量子効率の改善

- 格子状表面プラズモン(SP)アンテナの導入
  - 約1桁の改善

## • 動作機構の解明

- TM/TE偏光への応答、アンテナ材料依存性
  - 回折光とSOI導波路中の伝搬モードとの結合

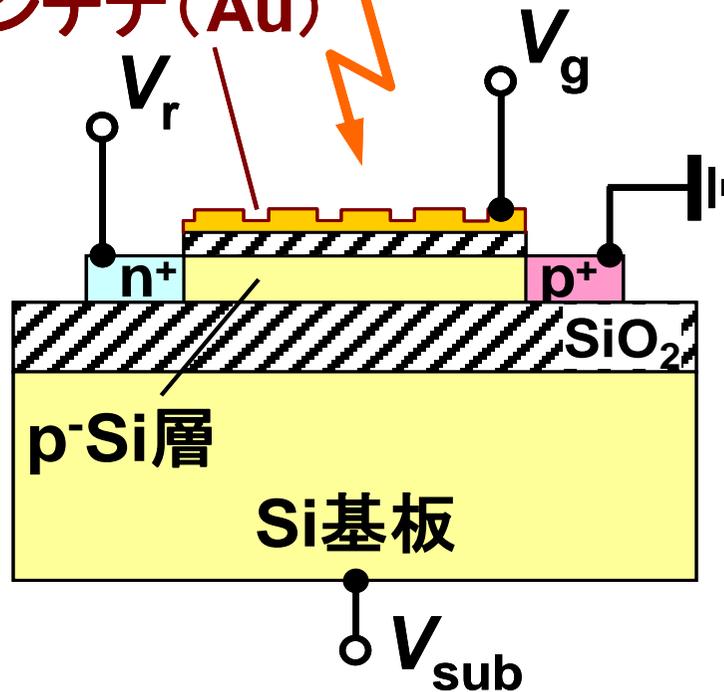
## • 屈折率測定への応用

- 光の斜め入射による分光感度ピークの分裂
  - 屈折率測定が実現

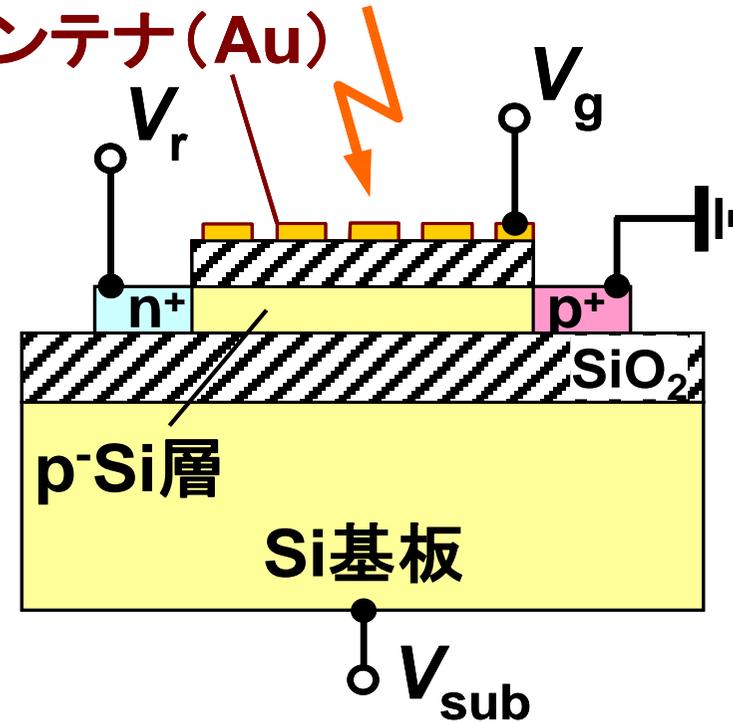
SOI: Silicon On Insulator

# SPアンテナ付きSOI PDの構造

表面プラズモン  
アンテナ (Au)



"表面プラズモン"  
アンテナ (Au)



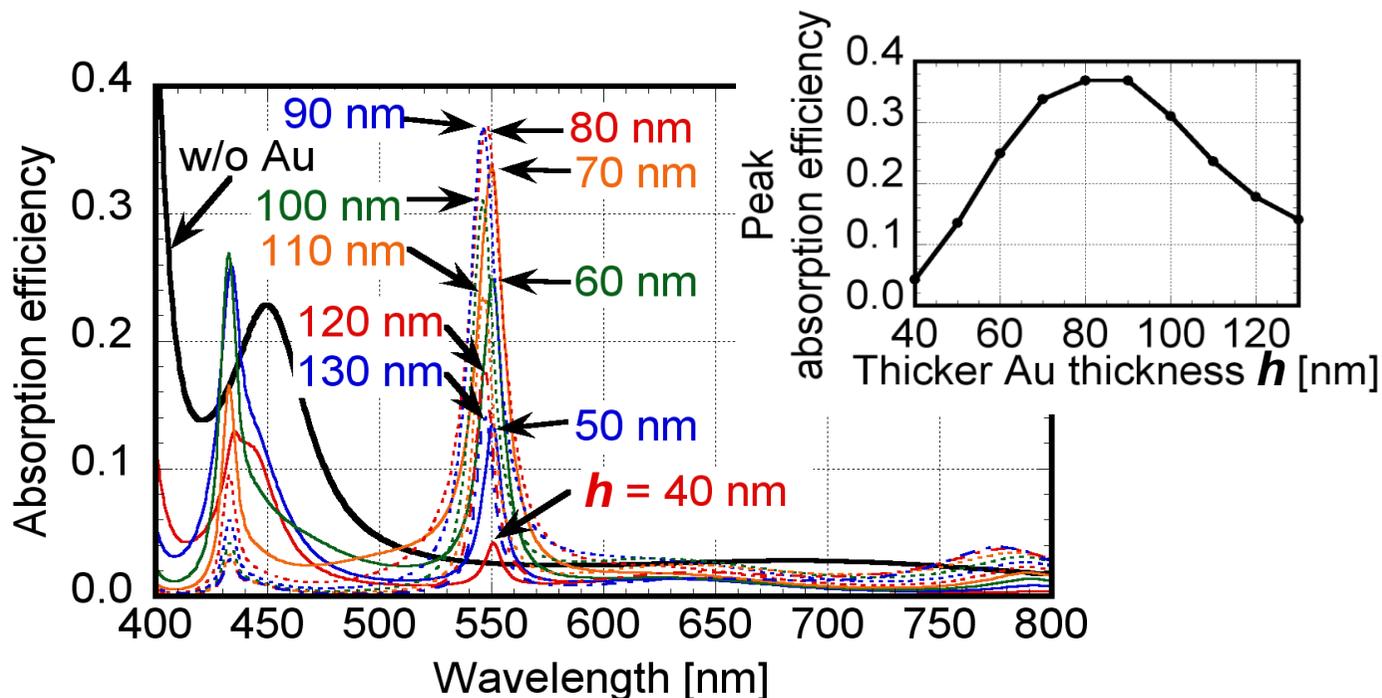
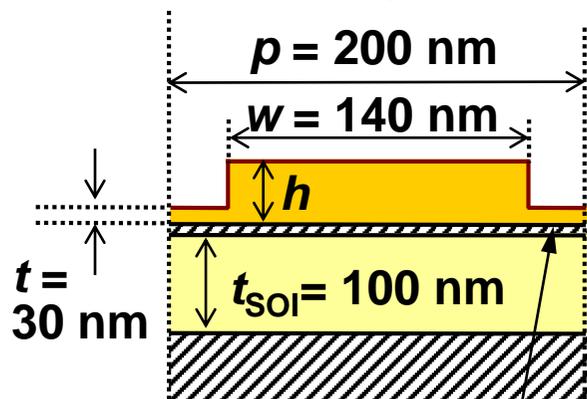
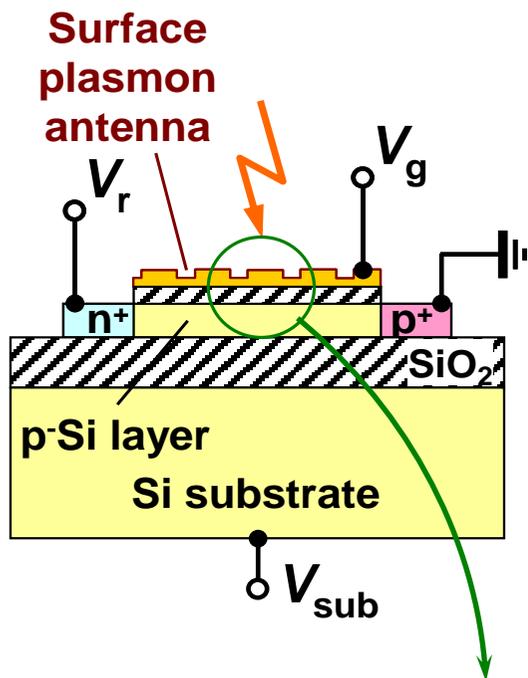
連続したAu格子のアンテナ

薄い(~5 nm)ゲート絶縁膜  
実験的には不成功

不連続なAu格子のアンテナ

厚い(~100 nm)ゲート絶縁膜  
実験的にも成功

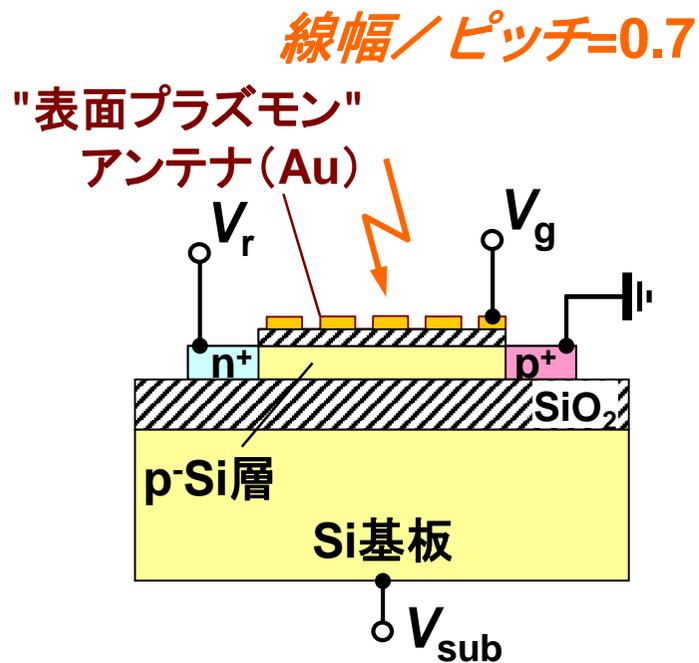
# 連続したAu格子のSPアンテナによる特性



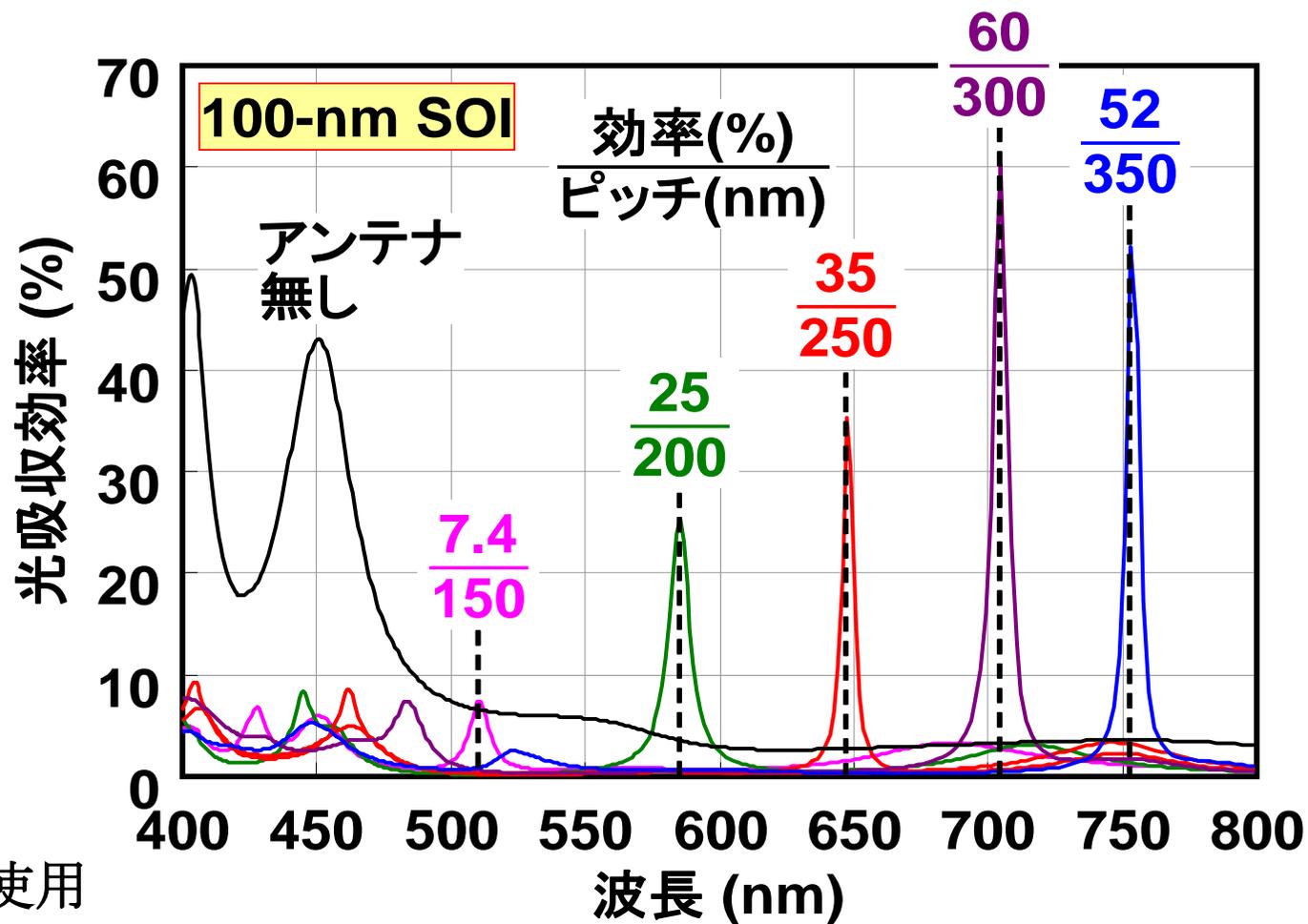
吸収効率はAuの厚さと共に増加し、80 nmで37%(14倍の向上度)に達する

5 nm SiO<sub>2</sub> Finite-difference time-domain (FDTD)シミュレーション

# 不連続なAu格子のSPアンテナによる特性

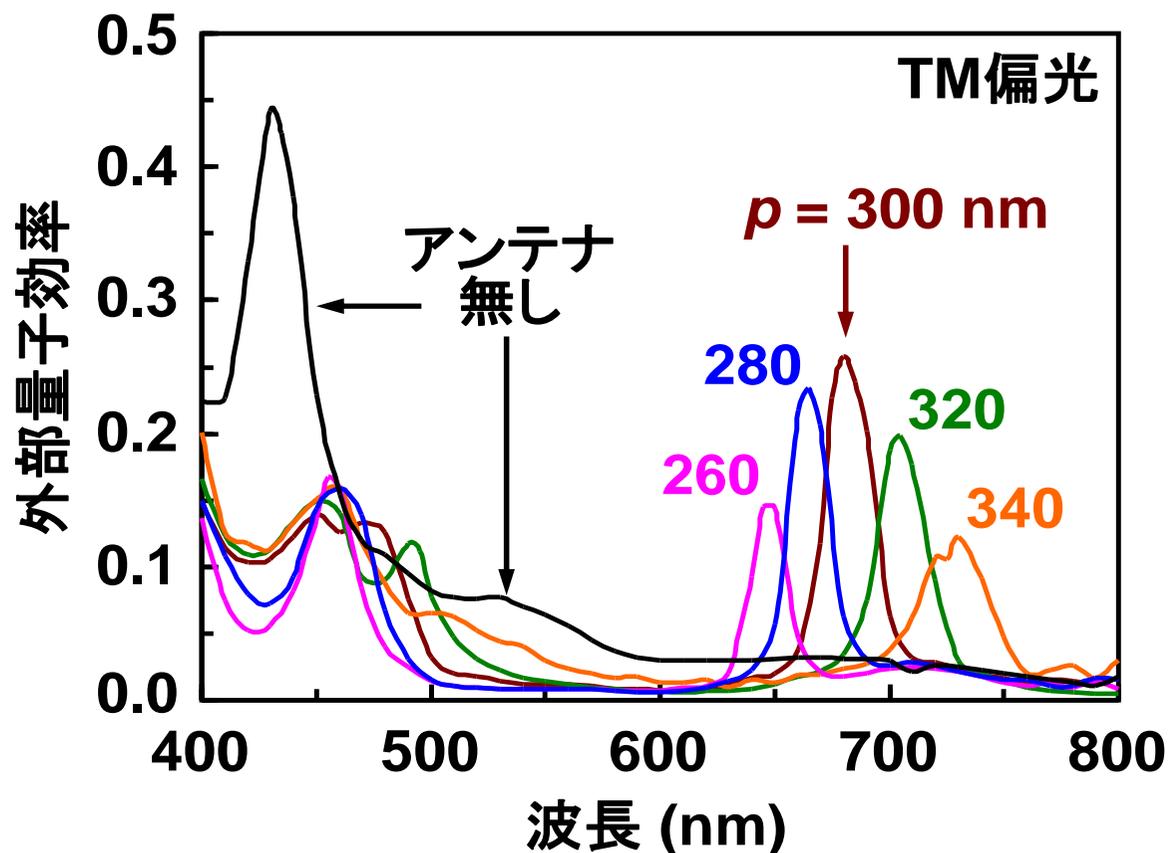
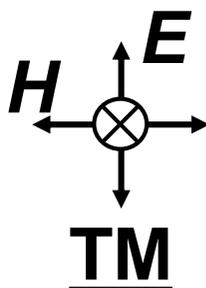
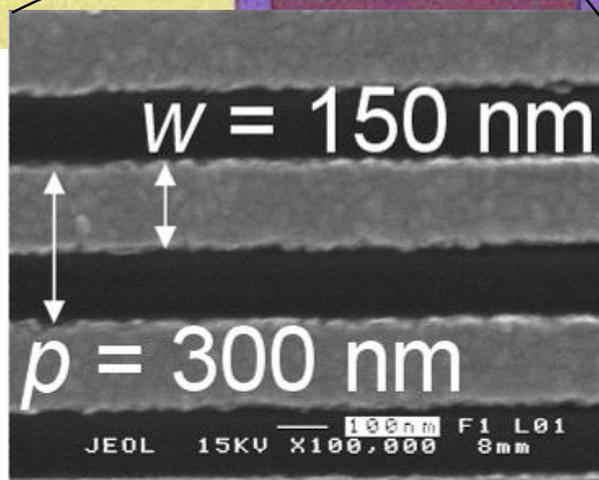
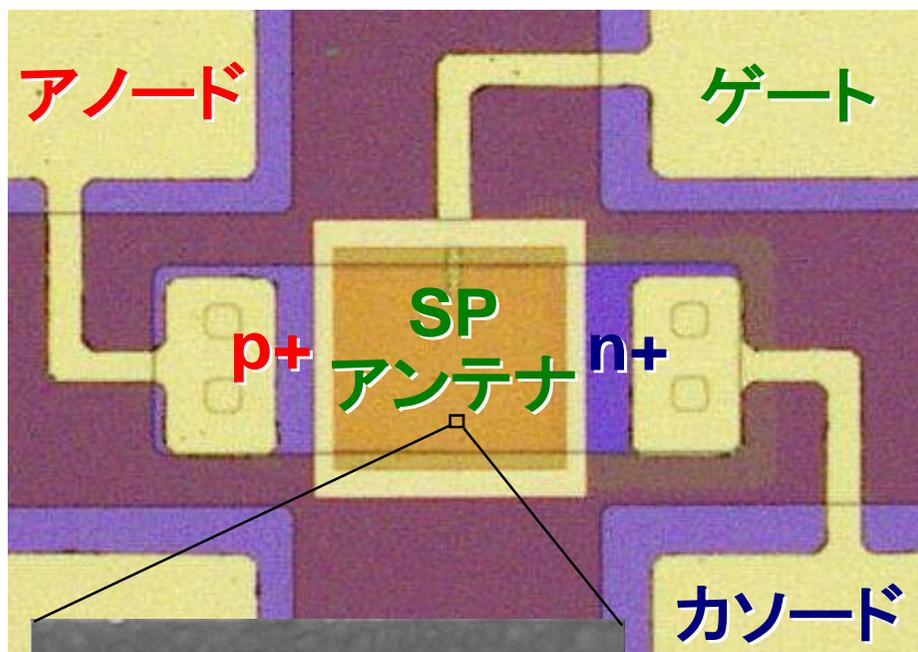


絶縁膜上の薄いシリコン  
(SOI: Silicon On Insulator)を使用



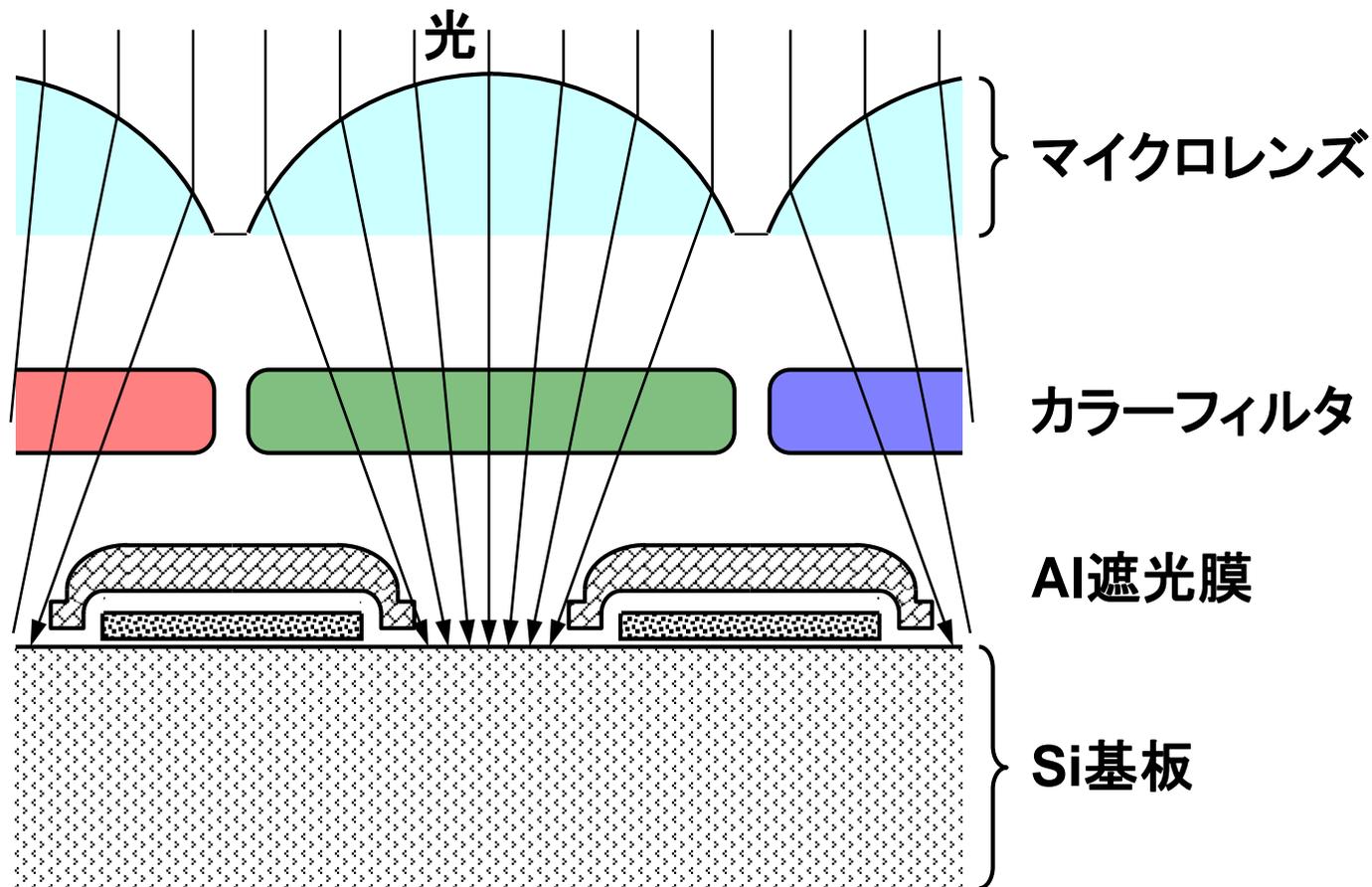
薄いSOI(100 nm)に対しても波長700 nmにおいて  
光吸収効率 60% (向上度×18)が達成可能

# SPアンテナ付きフォトダイオードの実測結果



95 nmの薄いシリコン層でも  
波長680 nmにおいて量子効率  
25%(向上度8.2倍)を達成

# 分光イメージングへの応用



フォト・ダイオード

従来のカラー・イメージセンサ

## 従来方式

- ・色の数だけ異なったフィルタ材料が必要
- ・リソグラフィ工程も色の数だけ必要

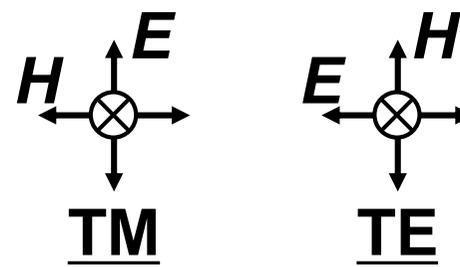
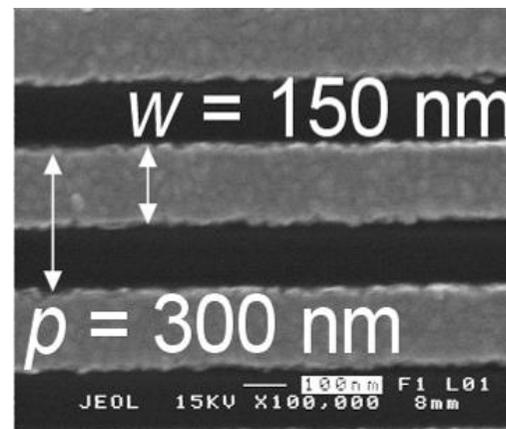
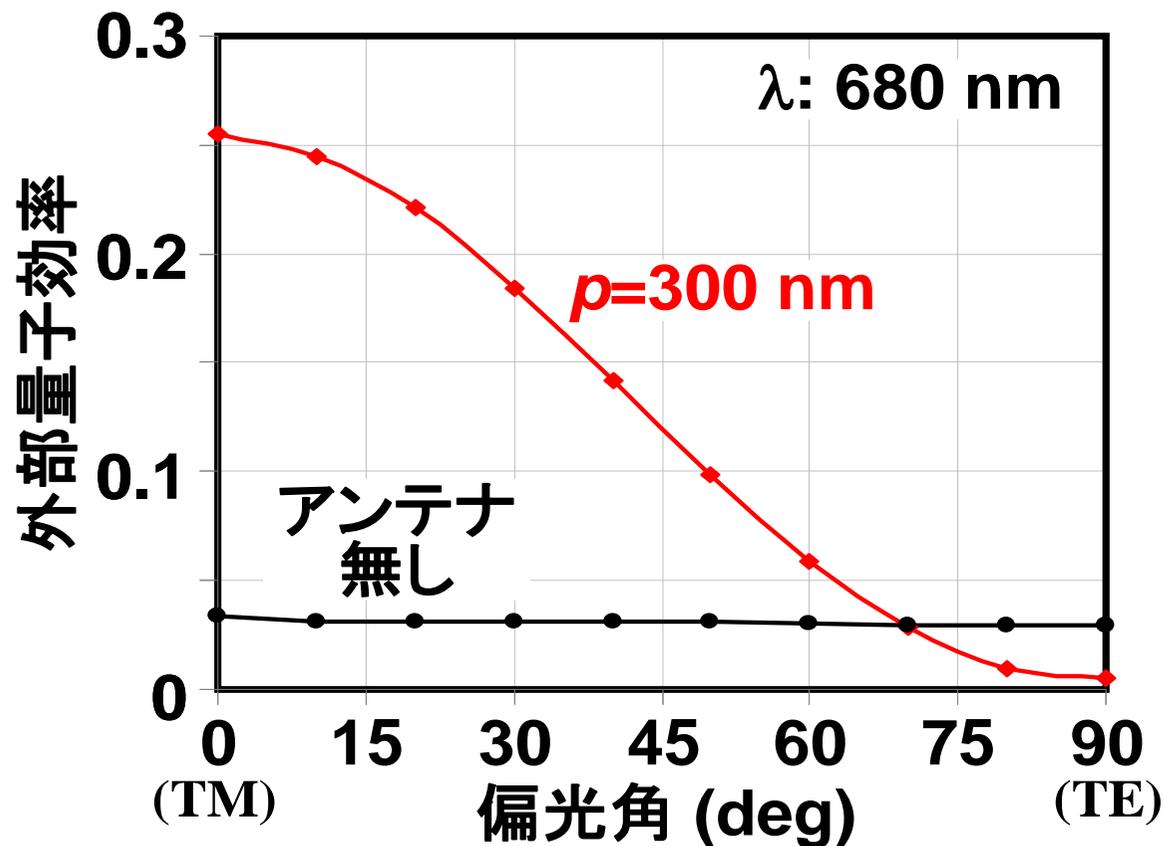
## SPアンテナ

- ・アンテナ材料は1種類
- ・リソグラフィ工程も1回



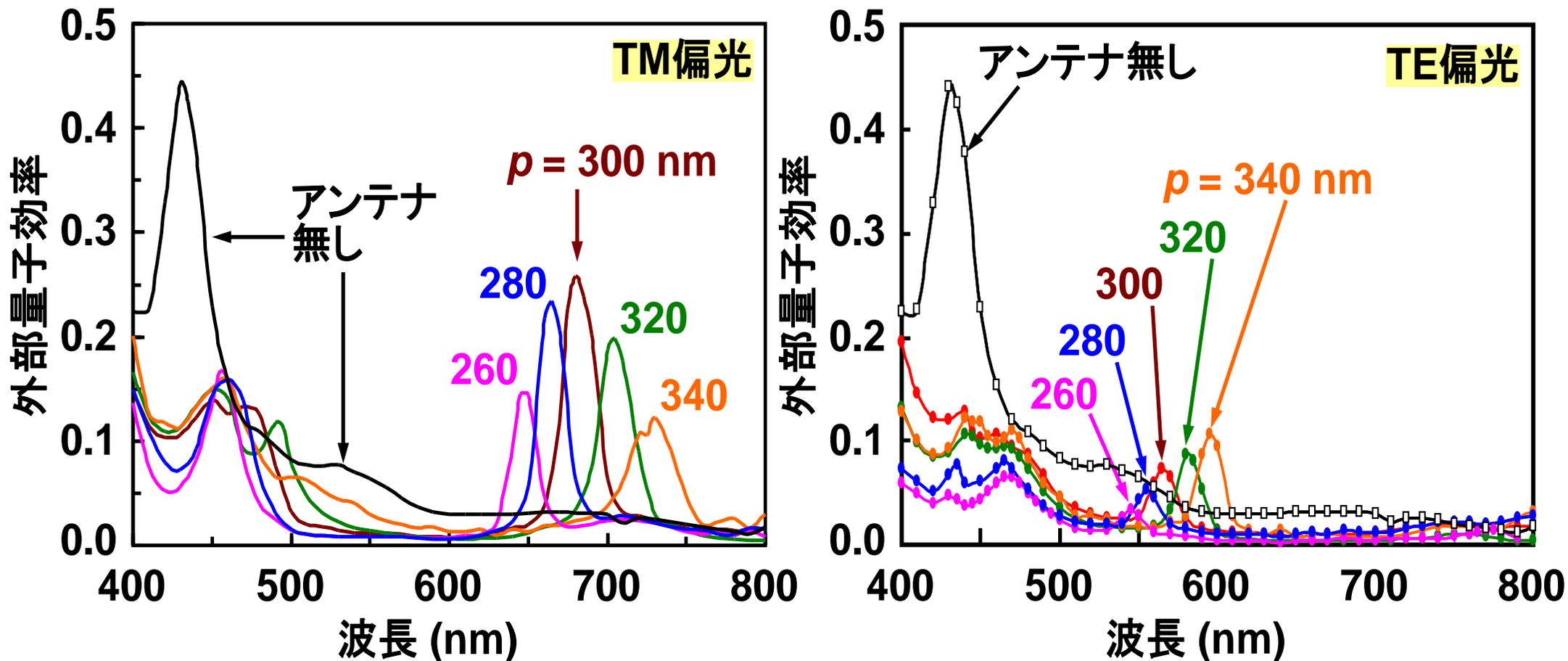
超多色化が容易に

# 外部量子効率の偏光角依存性



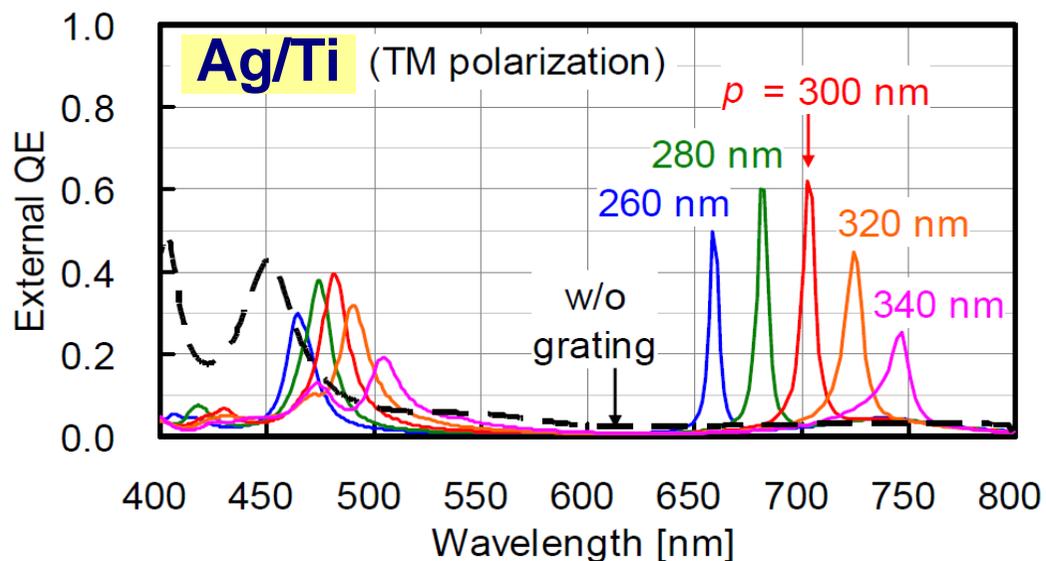
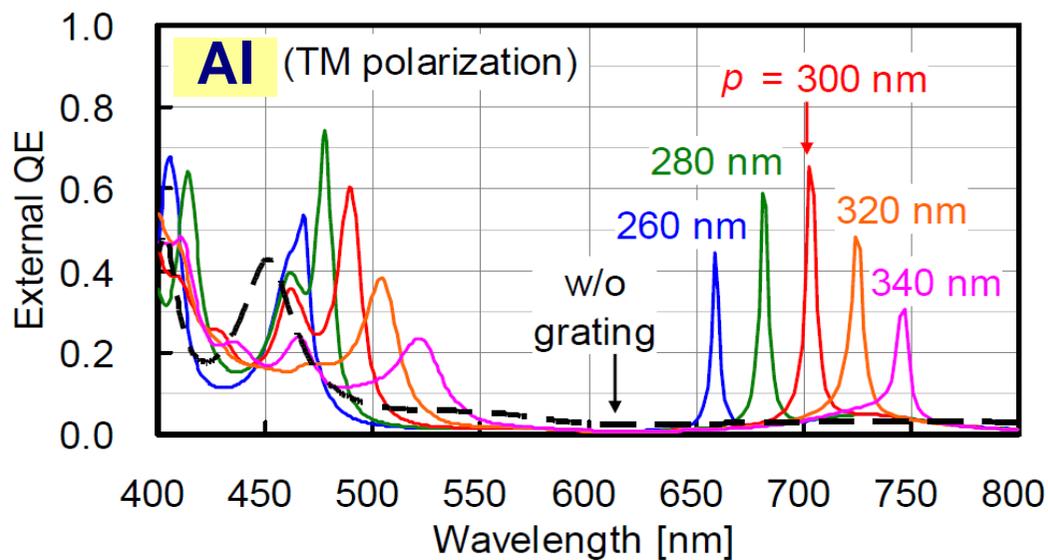
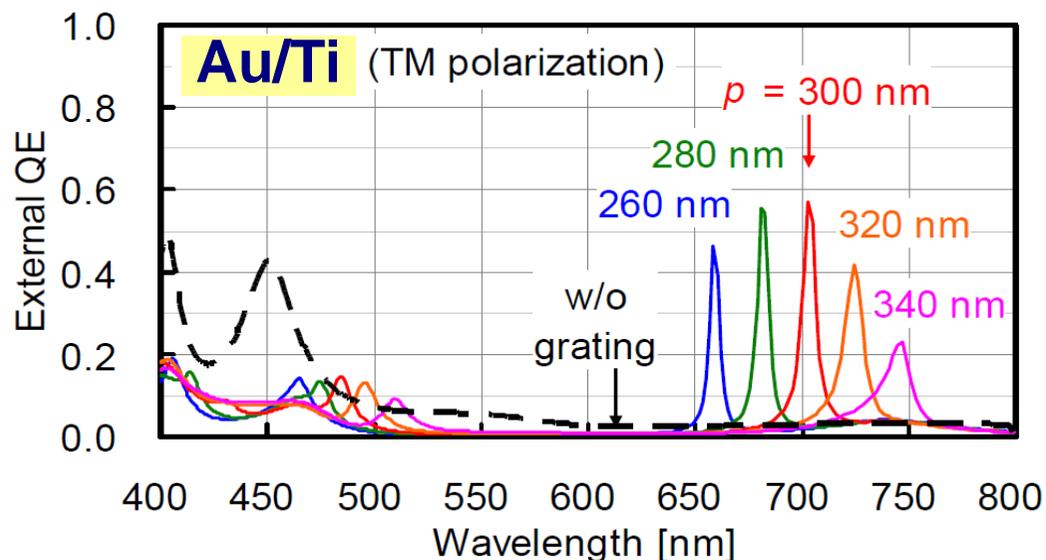
- TE/TM偏光の弁別比  $\times 46$  を達成
- 偏光を利用した光通信や偏光イメージングへの応用が考えられる

# TM/TE偏光への応答



TE偏光に対しても量子効率のピークが生じる  
→表面プラズモン(SP)以外の動作機構も含まれている

# 分光感度特性のアンテナ材料依存性

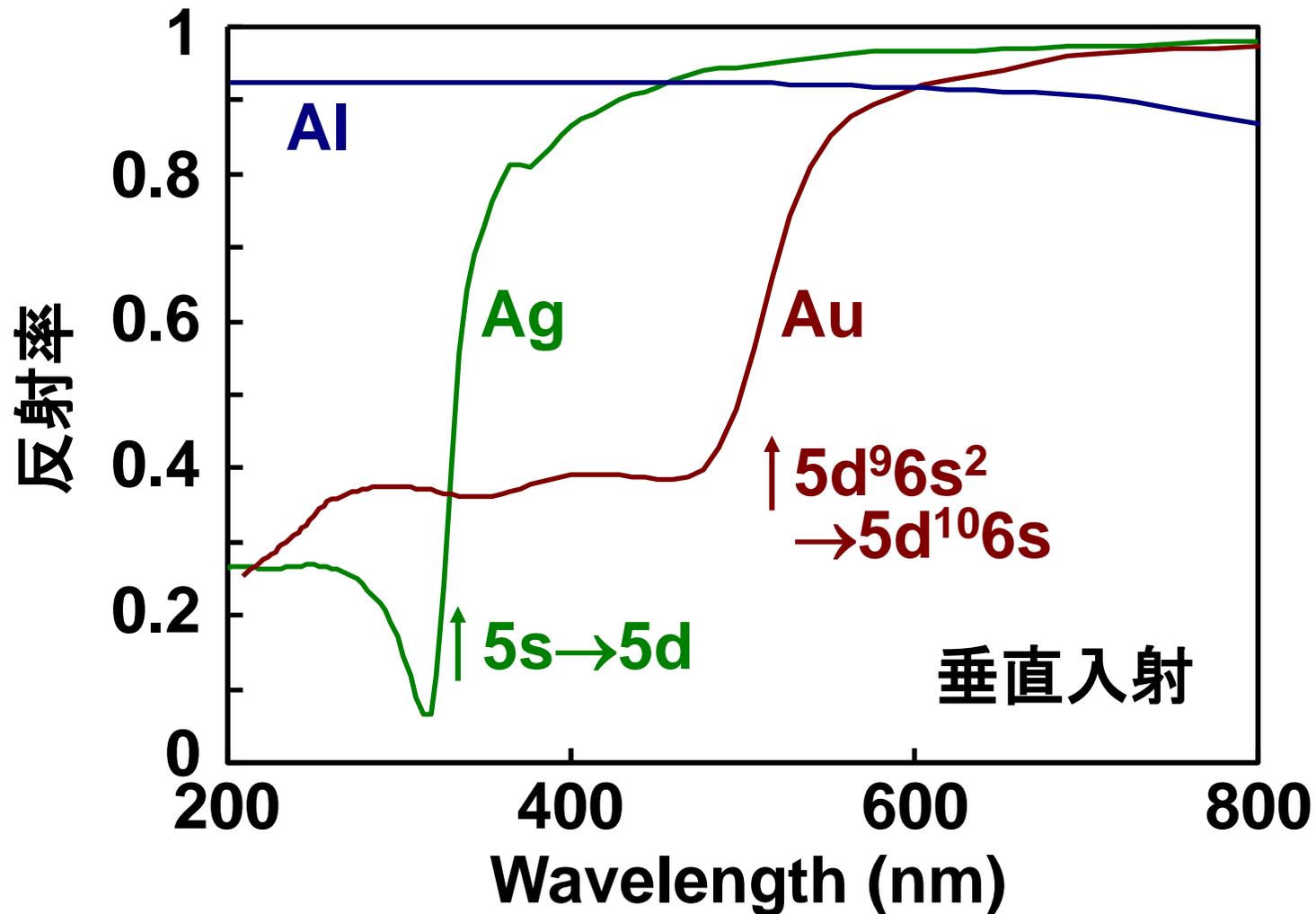


- ピーク波長は材料に依存しない
- ピーク高さも長波長域では殆ど同じ
- 安価なAlが使用可能

FDTDシミュレーション

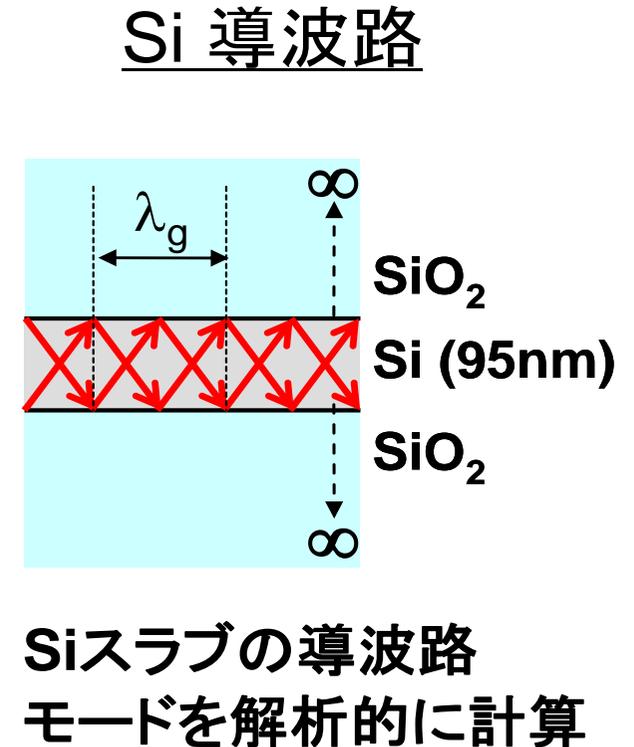
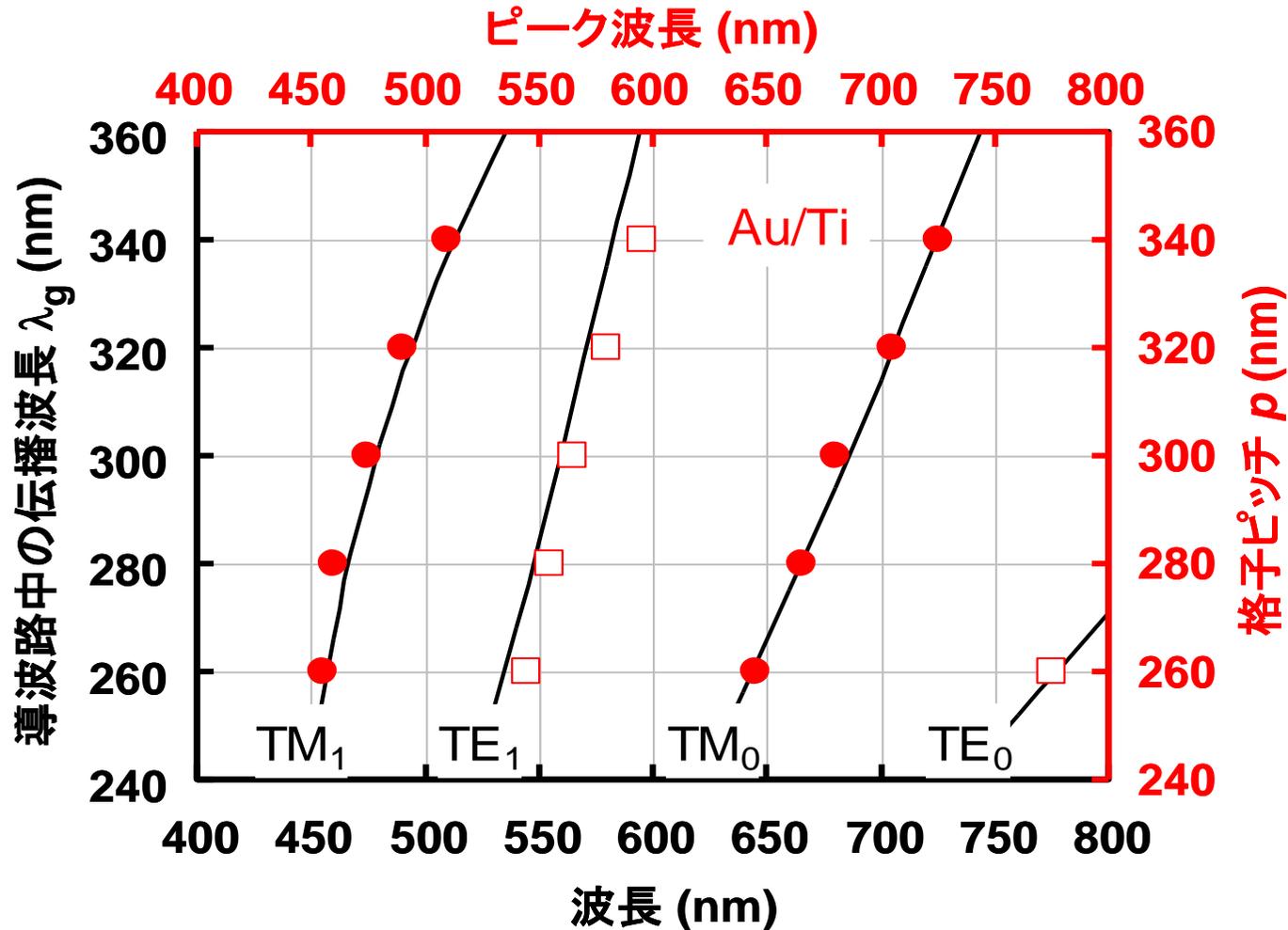
IEEE PTL 25 (2013) 1133

# Al, Ag, Auの分光反射率



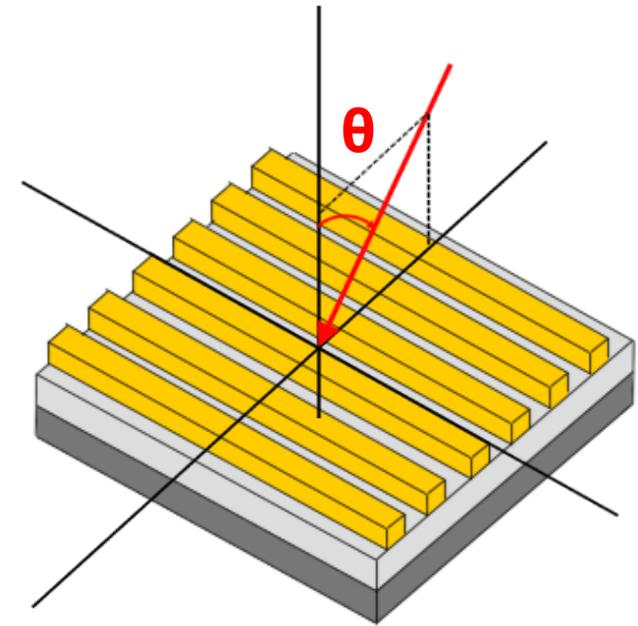
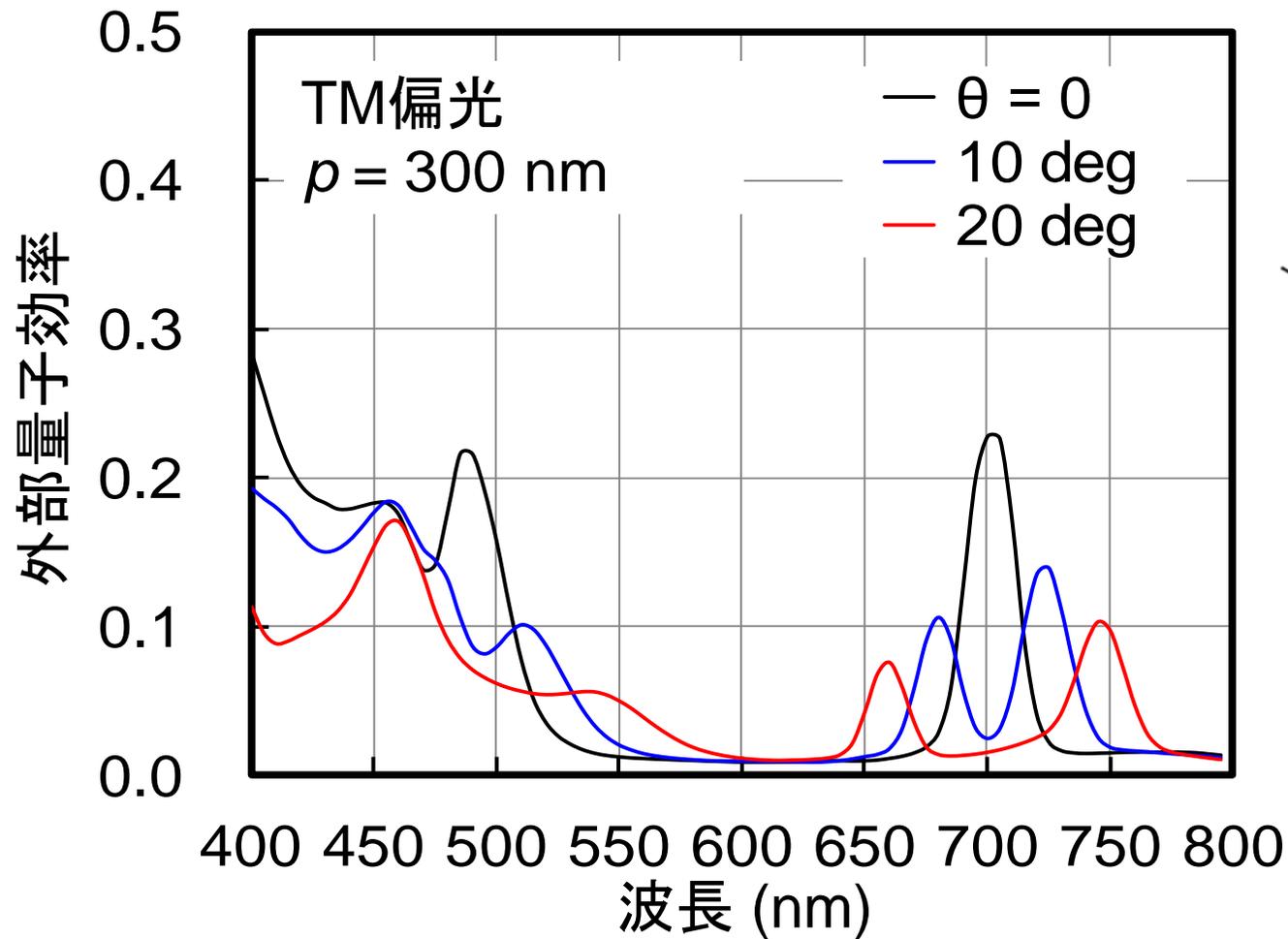
バンド間遷移により大きな吸収が生じる (Ag, Au)

# SPアンテナ付きフォトダイオードの動作解析



表面プラズモンアンテナの格子ピッチ  $p$  が SOI 導波路中の伝播波長  $\lambda_g$  と一致する時に光吸収が最大となることが判明

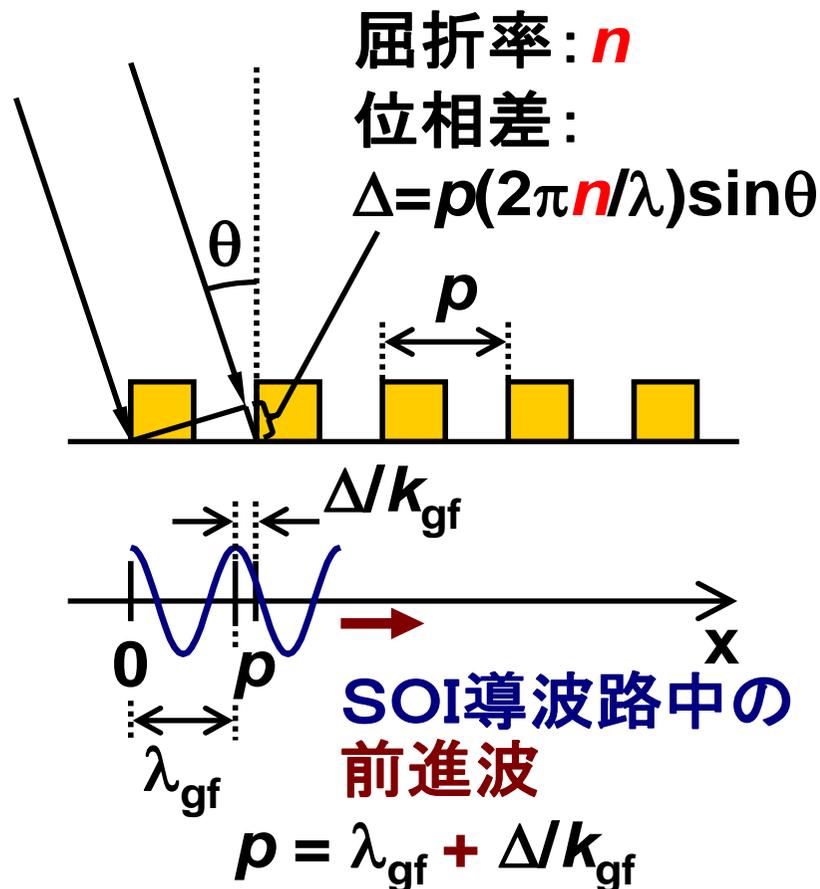
# 分光感度特性の入射角依存性



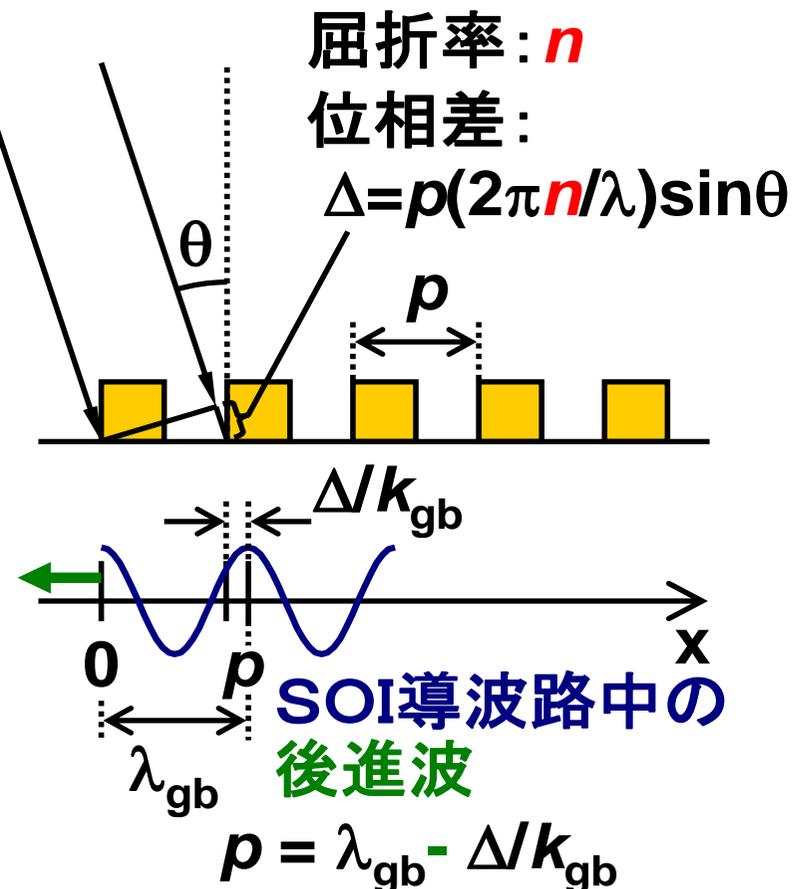
$\theta=0$ におけるピークが斜め入射によって分裂する

# SOI中の伝搬波長 $\lambda_g$ (斜め入射の場合)

回折光は伝搬波長の異なる前進波と後進波に結合する

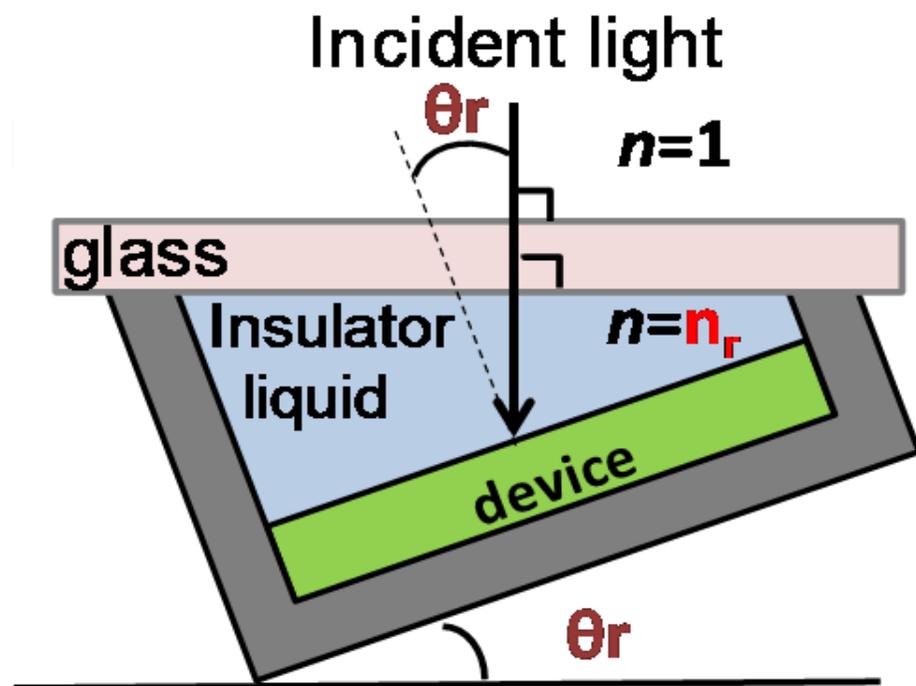


$$\lambda_{gf} = 1 / \left\{ (1/p) + (n/\lambda)\sin\theta \right\}$$



$$\lambda_{gb} = 1 / \left\{ (1/p) - (n/\lambda)\sin\theta \right\}$$

# 屈折率測定の概要

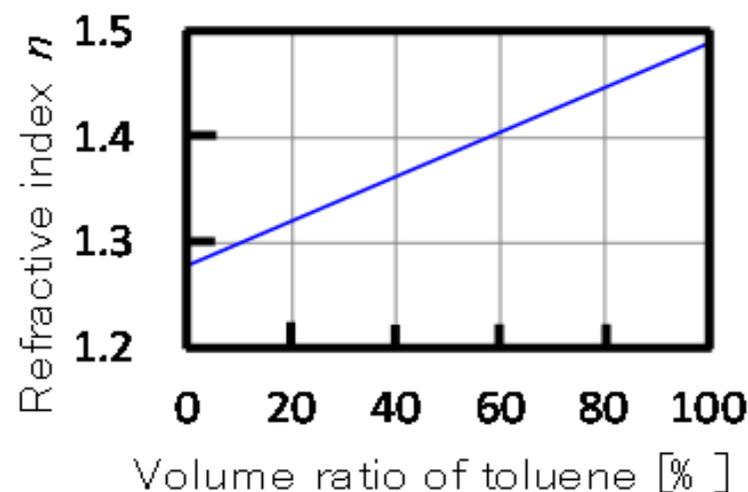


Insulator liquid

=Toluene +

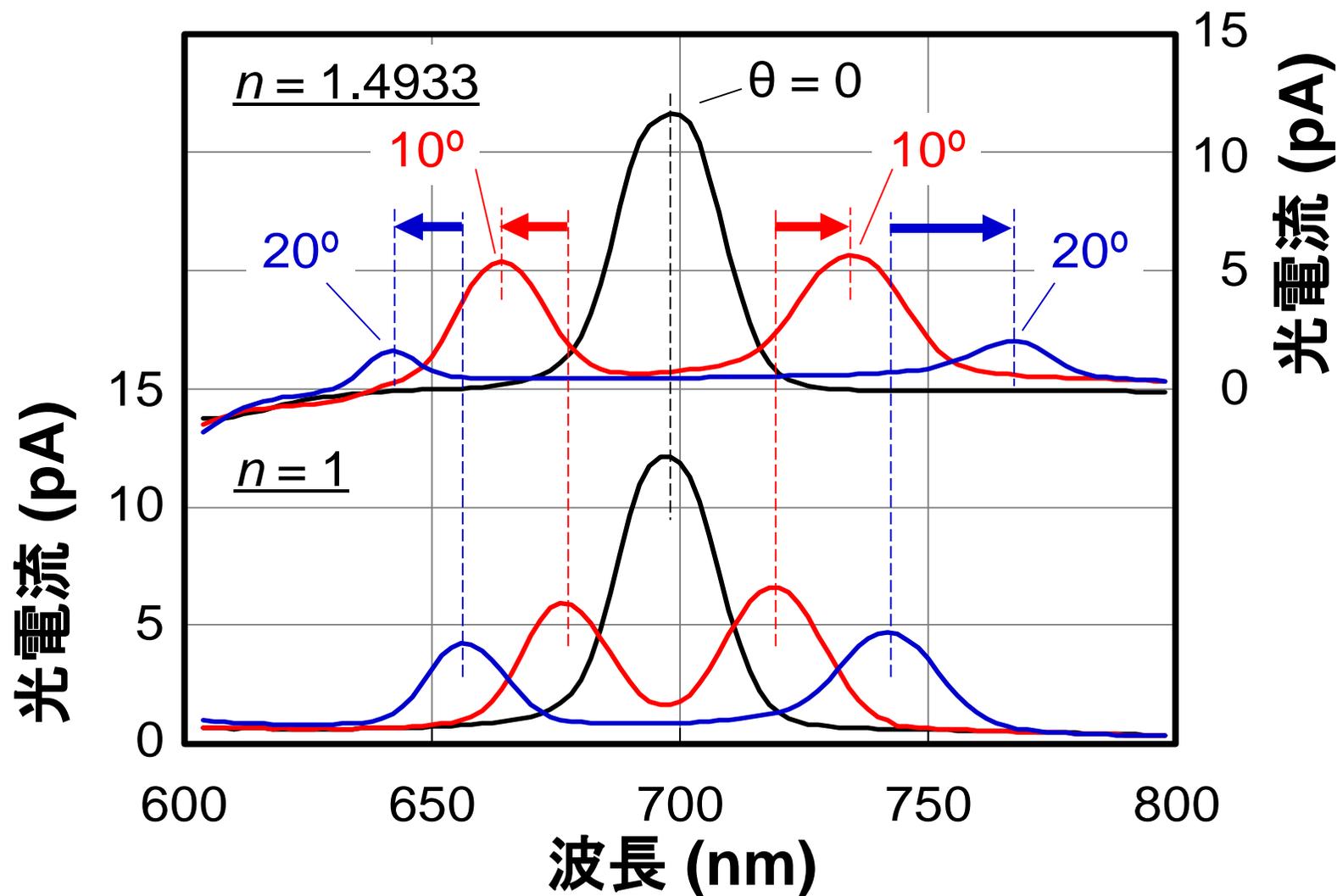
Novec73003M社 ハイドロフル  
オロエーテル

|     | Toluen<br>e | Novec<br>7300 |
|-----|-------------|---------------|
| $n$ | 1.49        | 1.28          |



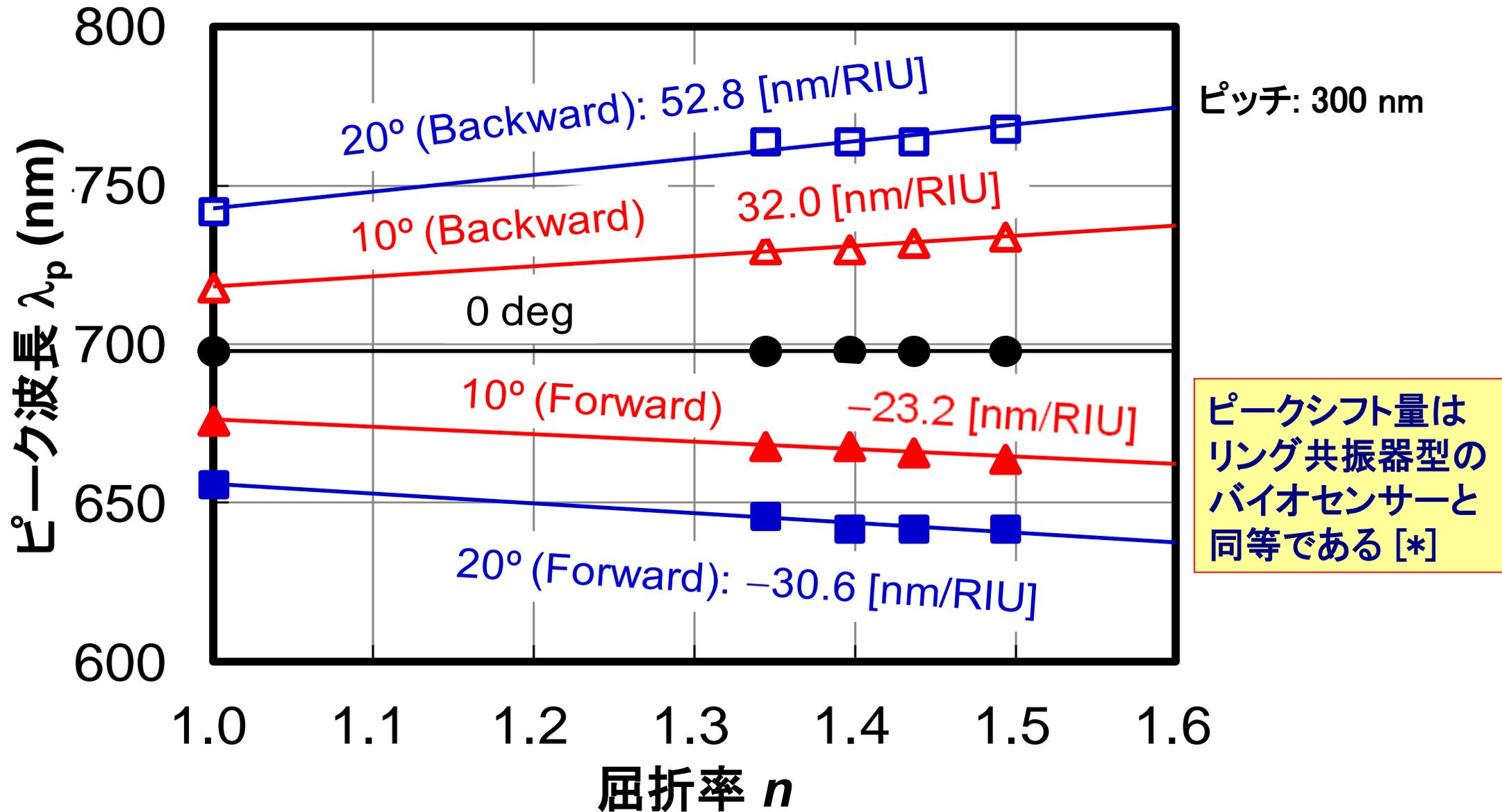
斜めに切った容器の中にPDを  
固定し様々な屈折率をもつ絶  
縁性液体に浸して測定

# 異なる屈折率に対する分光特性の変化



光を斜め入射するとピーク波長が屈折率によって変化する

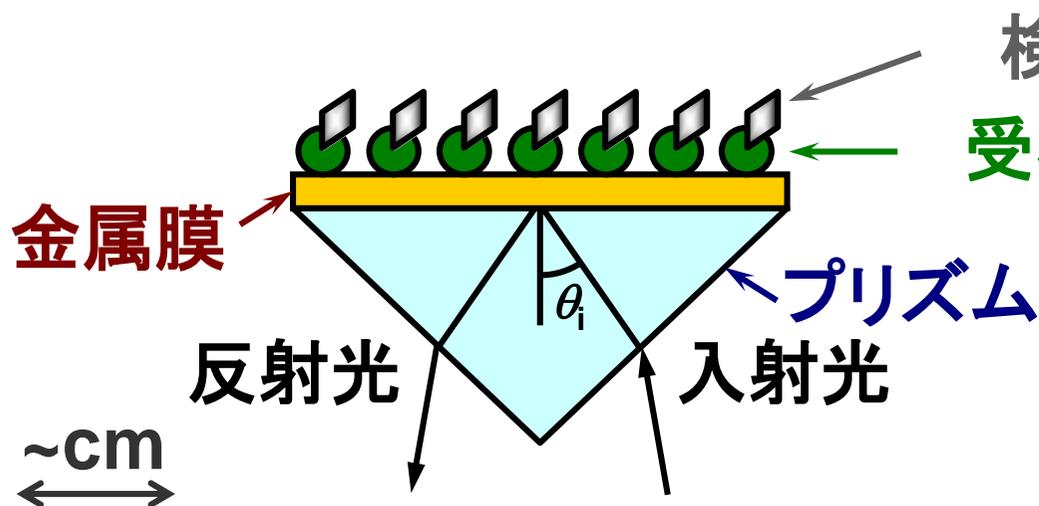
# ピーク波長と屈折率の関係



[\*] M. Iqbal, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron. 16(3), 654-661 (2010)

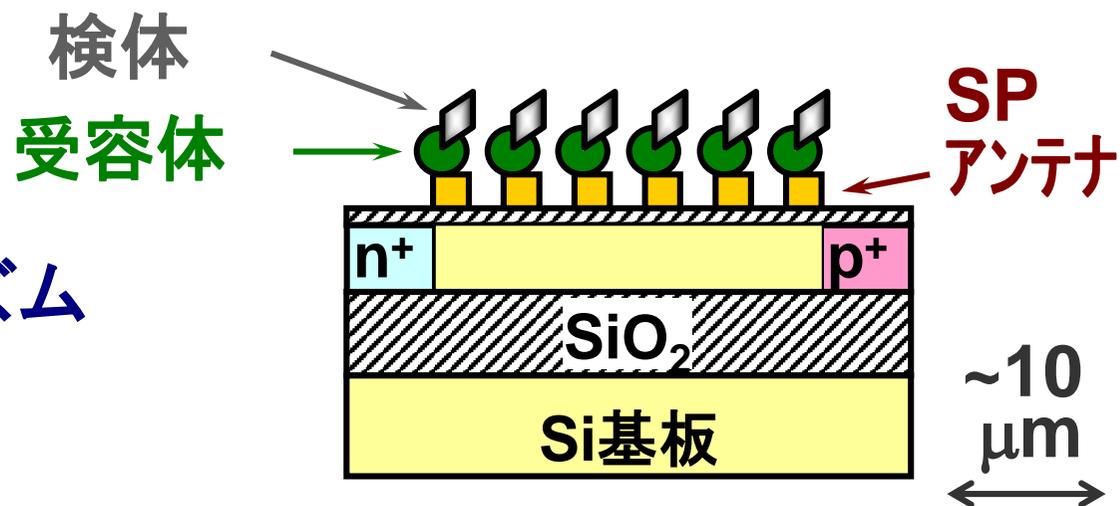
# SPRによる蛍光ラベル無しバイオセンシング

表面近傍の屈折率変化を検知



従来のSPRセンサ

- $\theta_i$  や  $\lambda$  を変化させる複雑な光学系が必要
- 多数のデバイスを集積化するのが困難



SPアンテナ付きフォトダイオード

- シンプルで平面的な構造
- 多数のデバイスをチップ上に集積して処理効率を大幅に向上できる

# 新技術の特徴・従来技術との比較

## • 特徴

- 光を当てるだけで測定でき受光系を別に設ける必要が無い  
ため、シンプルな光学系で高感度な屈折率測定が可能  
となる
- サイズが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 程度と小さいため、多数のフォト  
ダイオードを1チップに集積して多くのサンプルを同時に計  
測することが可能となる
- 同一チップ上にCMOS回路を搭載することにより、制御や  
演算の機能も含めた計測システムが1チップで構築できる

## • 比較

- 既存の表面プラズモン共鳴(SPR)センサーに比べると、光  
学系がシンプルで、サイズが小さく、CMOS回路との集積  
により高機能化できる点が優れている

# 想定される用途

- 一般的な液体や気体の屈折率測定
- 蛍光ラベルを用いない、屈折率測定にもとづくバイオセンシング
- 屈折率測定にもとづく化学物質センシング
- 化学プラントにおける高精度プロセス制御

# 実用化に向けた課題

- 低コストで生産性の高い表面プラズモンアンテナ製造技術（微細加工技術）の確立
- 特徴を活かした用途の開拓
- 測定対象に合わせた装置の開発
- 試料の処理手順（プロトコル）の開発（特にバイオ系試料の場合）

# 企業への期待

- 製造装置メーカー  
低コストで生産性の高い微細加工技術
- 医用検査機器メーカー  
バイオ系試料の処理手順（プロトコル）
- 計測・制御機器メーカー  
用途開拓、測定対象に合わせた装置開発
- 科学計測機器メーカー  
用途開拓、測定対象に合わせた装置開発

# 本技術に関する知的財産権、問合せ先

- ・ 発明の名称  
： 屈折率測定方法(未公開)
- ・ 出願番号：特願2013-187478
- ・ 発明者：猪川 洋、佐藤 弘明、小野 篤史
- ・ 出願人：国立大学法人 静岡大学

◎共同研究および関連する特許については、  
静岡大学イノベーション社会連携推進機構にお問い合わせください。

TEL :053-478-1702

Email : sangakucd@cjr.shizuoka.ac.jp



国立大学法人

静岡大学