

ナノオプティクス研究室の研究 シーズ

2024年11月19日

元垣内敦司

NOLMU (Nano-Optics Lab., Mie Univ.)

1

ナノオプティクス研究室

- 教員
 - 元垣内敦司 准教授
- アドバイザ
 - 平松和政 三重大学 名誉教授、三重大学 大学院工学研究科
リサーチフェロー
- 博士前期課程2年 2名
- 博士前期課程1年 2名
- 学部4年生 3～4名



NOLMU (Nano-Optics Lab., Mie Univ.)

2

准教授 元垣内敦司経歴

- 1990年3月 岐阜県立岐阜高等学校卒業
- 1993年3月 静岡大学 工学部 電子工学科退学(大学院への飛び入学のため)
- 1995年3月 静岡大学 大学院工学研究科(修士課程) 電子工学専攻修了
- 1998年3月 静岡大学 大学院電子科学研究科 (後期3年博士課程) 電子応用工学専攻 修了
- 1998年4月 三重大学 工学部 電気電子工学科 助手 着任
- 2006年4月 三重大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻 助手 配置換
- 2007年4月 三重大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻 助教 配置換
- 2012年4月 三重大学大学院工学研究科 電気電子工学専攻 准教授 昇進
- 2017年5月～2019年3月 三重大学 地域拠点サテライト 伊賀サテライト 准教授 兼務
- 現在に至る



元垣内の研究経歴

- 化合物半導体の結晶成長と光デバイス応用に関する研究
 - InP, InGaPの液相成長(1993年～1998年、静岡大学)
 - GaNの気相成長とGaN紫外線センサーの評価(1998年～2004年)
- 電子線リソグラフィを用いたマイクロ・ナノ光学素子作製に関する研究(2002年～現在)
 - 紫外光の光取り出しに関する研究(2002年～2004年、NEDO 産業技術研究助成事業)
 - バイナリ型回折レンズの作製と伝搬制御に関する研究(2005年～2020年、民間企業との共同研究、JST A-STEP事業)
 - 表面プラズモンを利用した光学素子に関する研究(2009年～現在、科研費基盤研究(C))
 - 3Dプリンターを用いた光学素子作製に関する研究(2019年～2023年)
 - メタ表面を用いた光学素子に関する研究(2021年～現在)
- LED照明に関する研究(2006年～2021年)
 - 伊勢形紙との融合(2006年～2008年、みえ研究交流サロン感性系照明開発技術研究会)
 - 自動販売機用LED照明(2008～2013年、文科省 知的クラスター創生事業、民間企業との共同研究)
 - 車載用LED照明(2012年～2014年、民間企業との共同研究)
 - 植物工場(2012年～2021年、大学院生物資源学研究科と民間企業との共同研究)
- 現在は、プラズモニクスとメタ表面に関する研究に絞って行っています。

ナノ옵ティクス研究室の研究活動

ナノ옵ティクス研究室

ナノオーダーのメタ表面と光の相互作用に関する新しい物理現象の解明とそれを利用した新規光学デバイスの創成

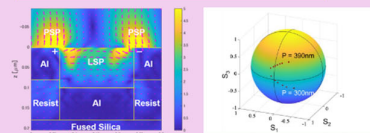
プラズモニクス

- 紫外光ファノスイッチング
- プラズモニックファノセンシング

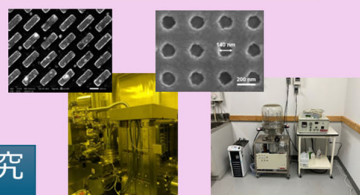
ポラリニクス

- プラズモニック偏光制御
- 白色キラルイメージング

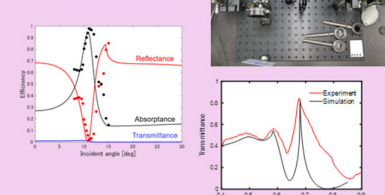
光学シミュレーション



電子線描画・真空蒸着



光学測定



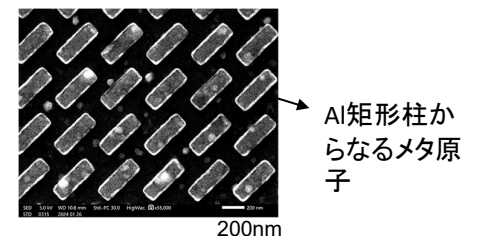
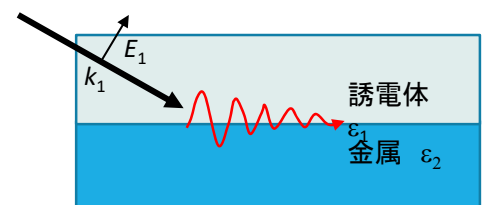
ナノ옵ティクス研究室の研究を支える固有技術

NOLMU (Nano-Optics Lab., Mie Univ.)

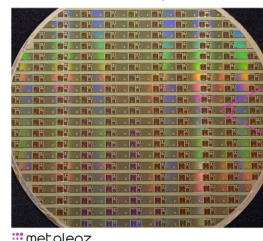
5

表面プラズモン、メタ表面とは

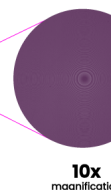
- 表面プラズモン
- 光の電場振動と電子の振動が共鳴し合っ、金属と誘電体の境界で、新しい電磁波が発生すること。
- センサー、偏光素子、発光素子、太陽電池などに応用。
- メタ表面
- 誘電率と透磁率の値を自由に変化させることができる人工材料をメタマテリアルという。
- メタマテリアルは3次元構造であるのに対し、メタ表面は微細な構造を2次元的に並べたものである。
- 薄型レンズ、透明マントなどに応用



12 inch wafer with 5,000 lenses

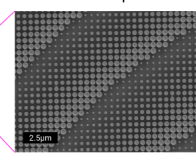


1mm lens



10x magnification

nanoscale pillars



20,000x magnification

メタ表面を用いたメタレンズ

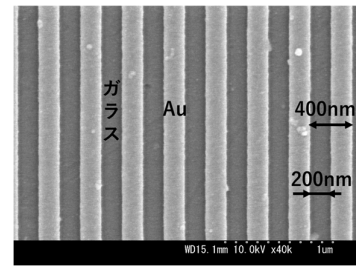
Nikkei Xtechより

NOLMU (Nano-Optics Lab., Mie Univ.)

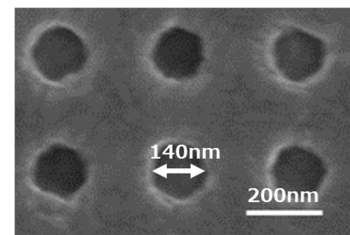
6

ナノ構造で光を制御する-プラズモニクス・メタ表面の研究-

- 電子線描画装置で**ナノレベルの周期構造を作製**し、新しい機能を持つ光学素子を実現する
- **周期構造**を使って、入射光の特性を制御して必要な出射光を取り出す。(透過、吸収、偏光、回折など)
- **表面プラズモン共鳴**や**メタ表面**を利用した光デバイスへ応用する。
 - 屈折率センサー、偏光変換素子、白色発光素子、光学フィルター、メタレンズなど
 - 我々の研究室では、**表面プラズモンセンサー**、**紫外線通信用ファノスイッチング素子**、**プラズモニック波長板**などを作製しています。
- ものづくりをするために必要な**設計・シミュレーション**も行います。



表面プラズモンセンサーの電子顕微鏡像



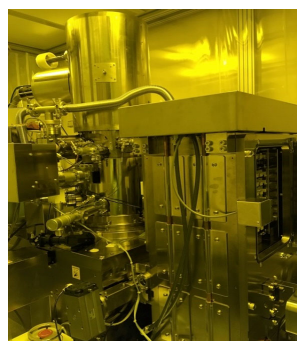
Alナノホールアレイの電子顕微鏡像

名古屋大学に出かけてものづくりをします

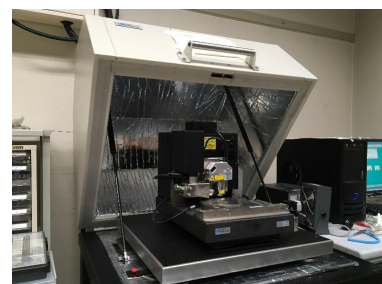
- 電子線描画装置、反応性イオンエッチング装置、原子間力顕微鏡を借りに、名古屋大学まで行きます。
- 特に電子線描画装置を利用します。
- シミュレーション、金蔵薄膜堆積、リフトオフ、光学的特性評価は三重大学で行います。



RIE装置
(反応性イオンエッチング装置)



電子線描画装置



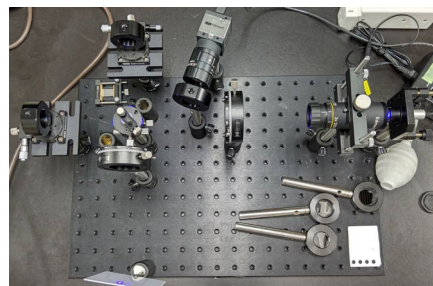
原子間力顕微鏡

主な実験用設備

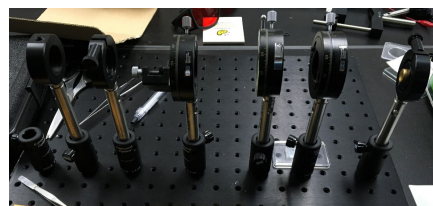
- 真空蒸着装置、スパッタ装置
 - 金属薄膜の成膜に使っています。
- 光学測定装置
 - 実験目的に合わせて、装置を組み立てて、作製したサンプルを評価します。



真空蒸着装置



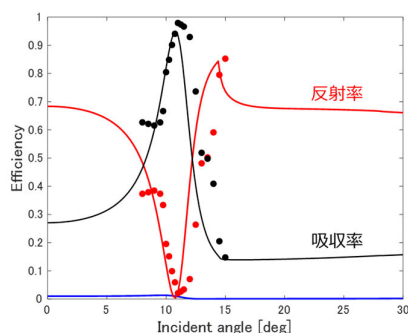
マイケルソン干渉計を使った偏光特性評価装置



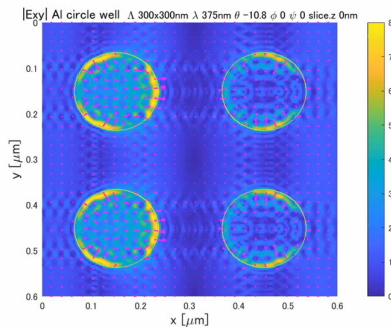
透過型セナルモン法装置(位相差を測定)

光学シミュレーション

- 電磁界解析によって、作製したい試料の設計や物理現象の考察を行います。
- 数値計算ソフトMATLABを利用した厳密波結合解析(RCWA法): 周期構造の反射率・透過率・吸収率、電磁場分布の計算が可能
- フリーソフトOpen THFDを利用した時間調和有限差分法(THFD法): 非周期構造の電磁場分布も計算可能

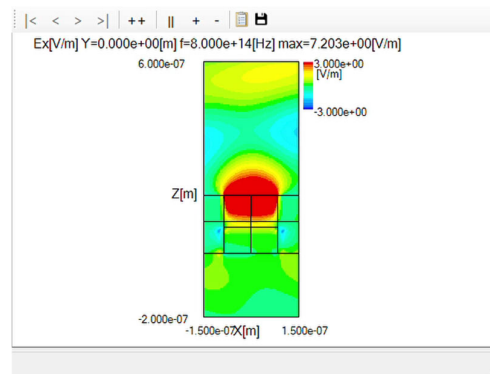


反射率・透過率・吸収率
スペクトル



電磁場分布

RCWA法の一例



電磁場分布

THFD法の一例

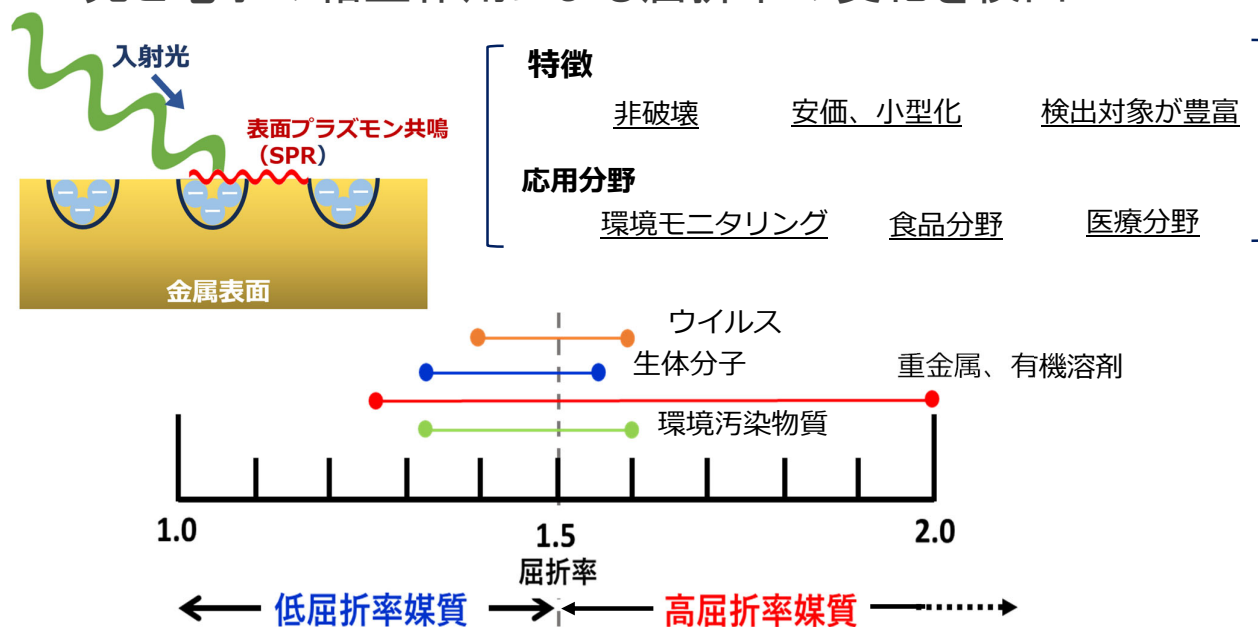
現在実施中の研究テーマ

- 産学連携が可能な研究テーマ
 - ファノ共鳴を利用したプラズモニックファノセンサーに関する研究
- 基礎から応用研究への過渡期のテーマ
 - Alナノホールアレイを用いた紫外光完全吸収体と光スイッチへの応用に関する研究
- 基礎研究段階のテーマ
 - プラズモニックメタ表面を用いた円偏光変換素子に関する研究
 - プラズモニックメタ表面を用いたキラルメタ表面に関する研究

表面プラズモンセンサー

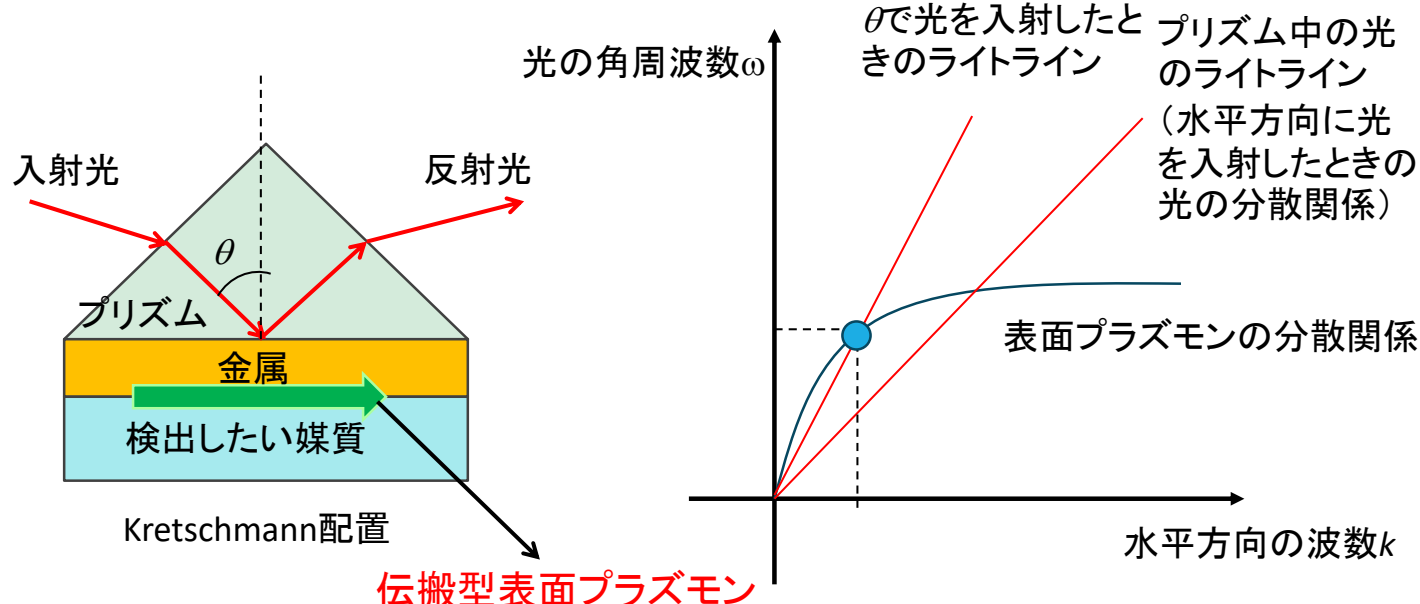
プラズモニックファノセンサーの研究背景

- 表面プラズモンセンサー
 - 表面プラズモン共鳴を検出原理とした光学センサー
 - 光と電子の相互作用による屈折率の変化を検出



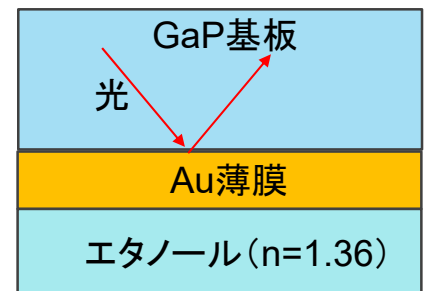
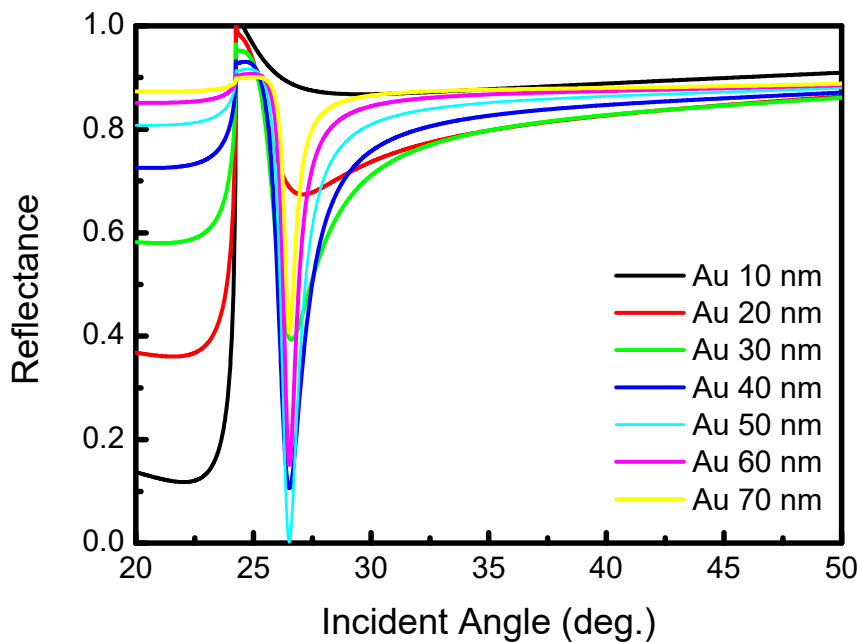
クレッチマン配置の表面プラズモンセンサー

- 一般的に表面プラズモンを励起する方法として、全反射減衰法が利用されており、プリズムと金属薄膜からなる Kretschmann 配置が知られている。プリズム中に角度



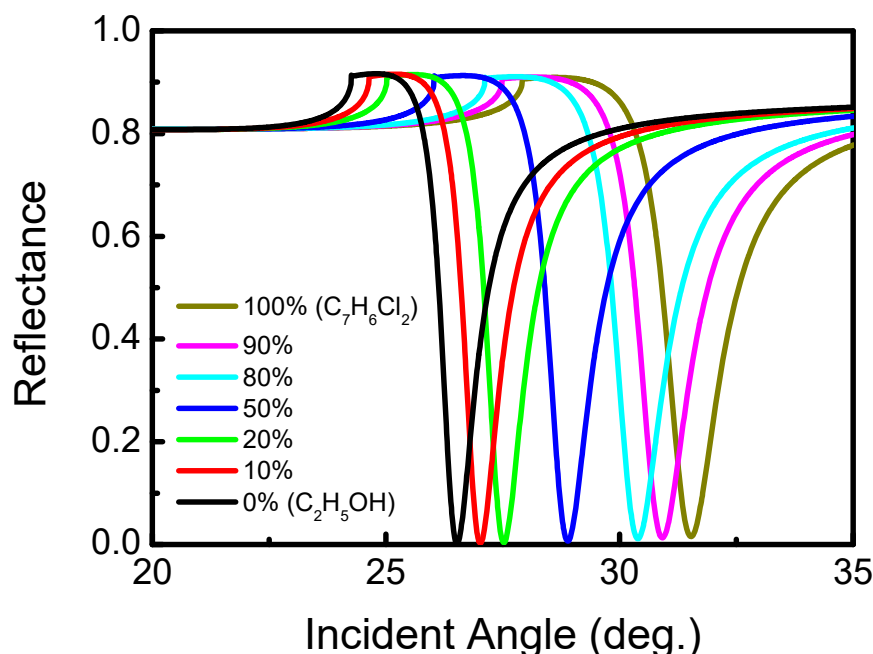
GaP基板を用いたクレッチマン配置の表面プラズモンセンサー

- エタノール(屈折率1.36)の場合
- 27.0° 付近に反射率のディップがある。このディップは表面プラズモン共鳴によるものである。
- ここを見つけてセンシングする。



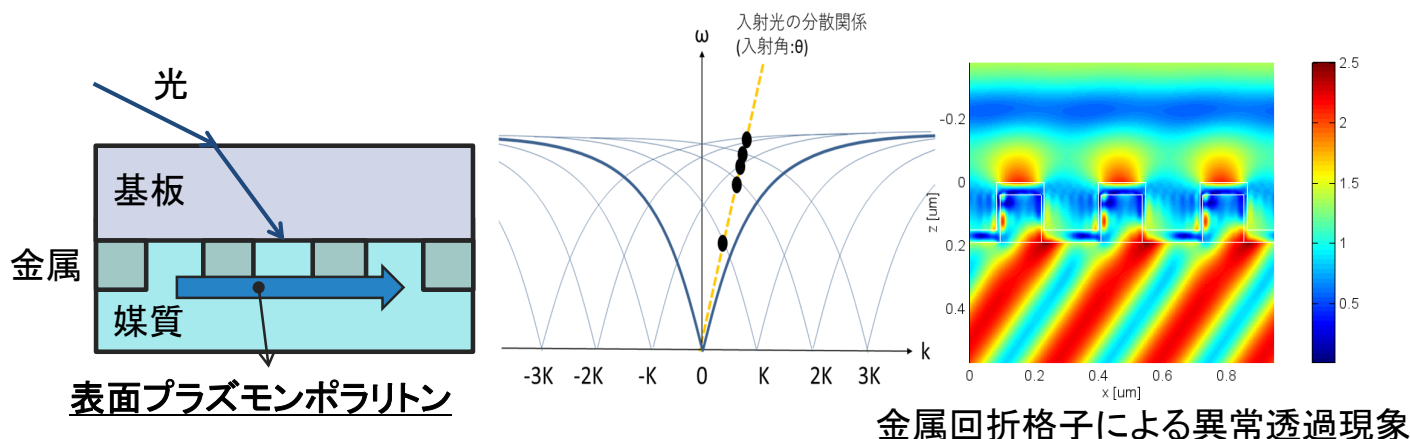
屈折率変化

- 屈折率を変化させると反射率のディップの位置が変化する。



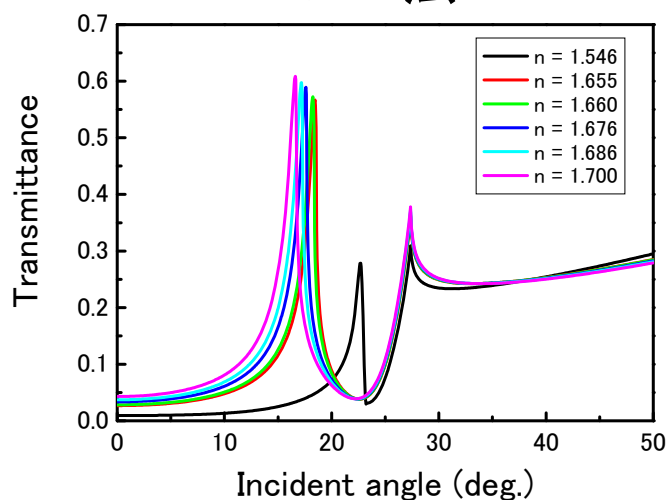
金属回折格子を用いた表面プラズモンセンサー

- 金属回折格子において、格子に光を入射したときに起こる回折を利用して表面プラズモンを励起させる方法
- プリズムを用いた方法に比べ、小型化、表面プラズモンの励起条件を選びやすい
- 金属ナノスリットで表面プラズモン共鳴が発生すると光の異常透過現象が発生
- 元垣内他、特許第6534114号 光学装置の製造方法及び光学装置

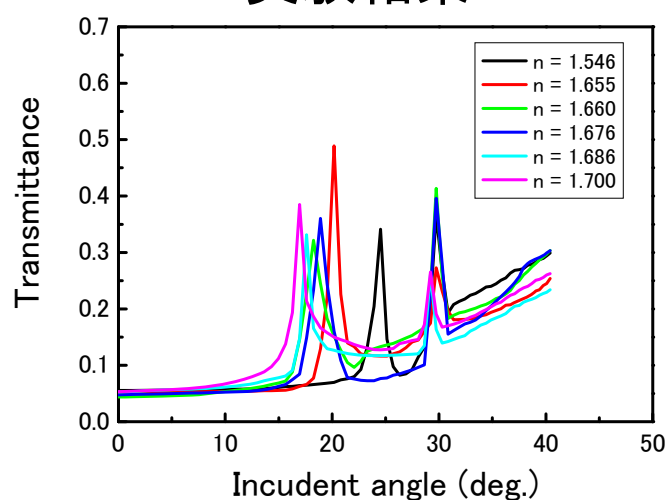


周期300nmの金属回折格子を用いた表面プラズモンセンサー

RCWA法



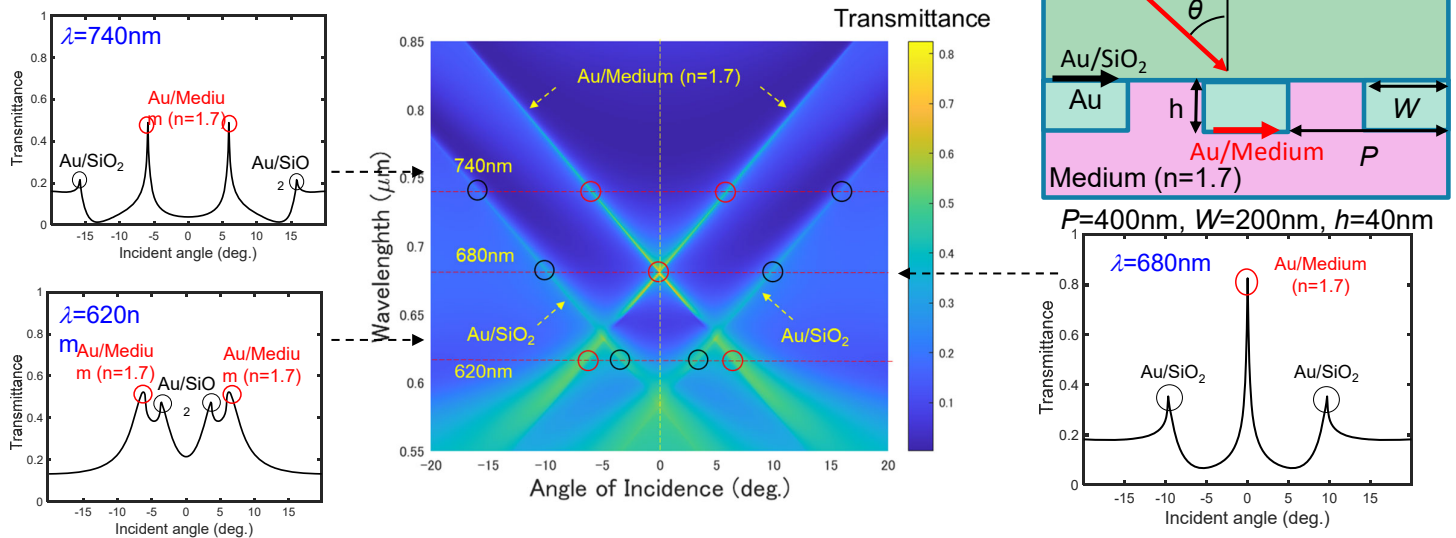
実験結果



- 2-4ジクロロトルエン ($n=1.55$)、1ブロモナフタレン ($n=1.65$)、1ヨードナフタレン ($n=1.70$)などで測定
- 屈折率に依存しないピーク
- 屈折率に依存するピーク $\Rightarrow$ このピークを使ってセンシングをする

プラズモニクファノセンサー1(非伝搬モード野表面プラズモンセンサ)

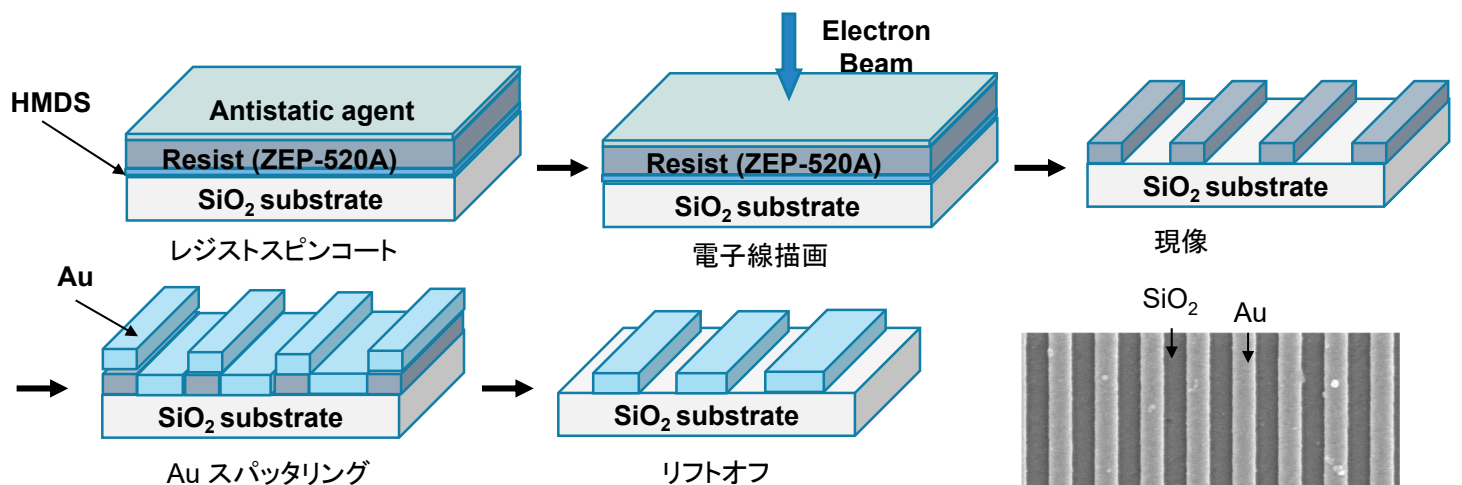
- ファノ共鳴を利用した表面プラズモンセンサー
- 垂直入射で発生する伝搬しない伝搬型表面プラズモンを利用。
- 垂直入射にすることで、入射角度の精密制御が省略できる。(非伝搬モード)



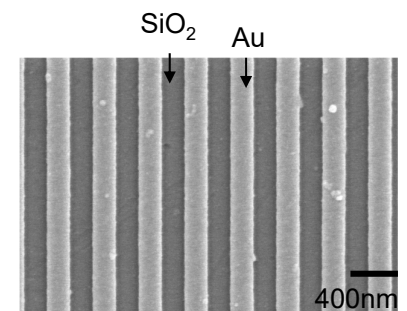
- 680nm、 0° で2つのAu-媒質界面での表面プラズモン分散関係が重なり、強い透過強度を得る。

プラズモニクファノセンサーの作製

- 電子線描画、スパッタ、リフトオフにて作製



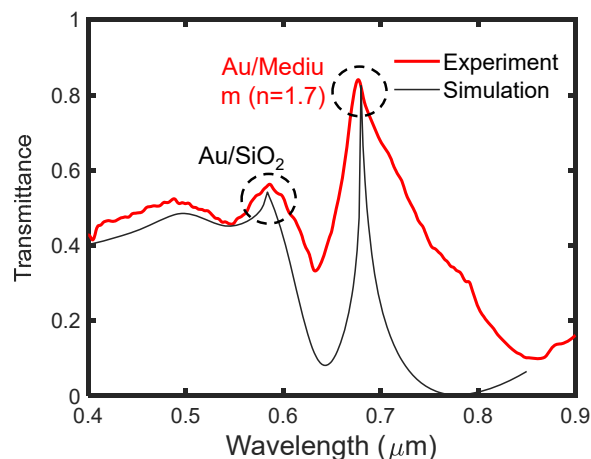
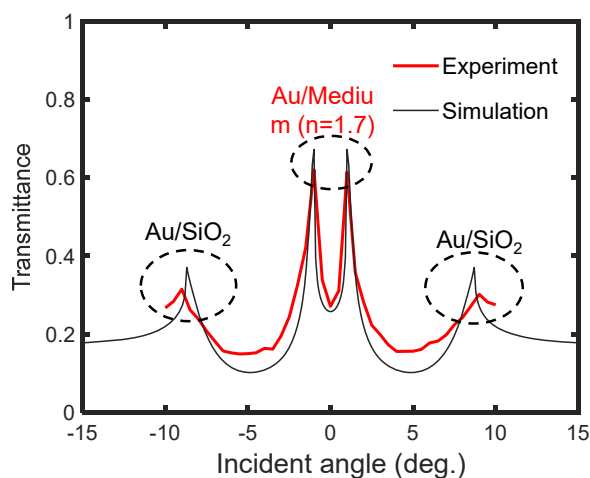
- 試料はほぼ設計通りにできた



Au 1次元回折格子の表面SEM像

透過率スペクトル測定

- 角度スペクトル(@670nm)
- 波長スペクトル(垂直入射)

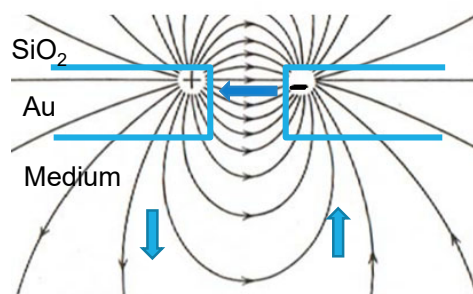
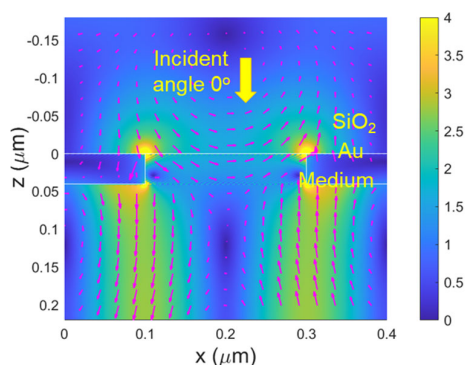


- シミュレーション結果と同様の結果が得られた。
- 非伝搬モードによるセンシングを実証できた。

非伝搬モードの物理的メカニズム

局在型表面プラズモンと伝搬型表面プラズモンの共鳴であるファノ共鳴により、透過率のピークが得られた。

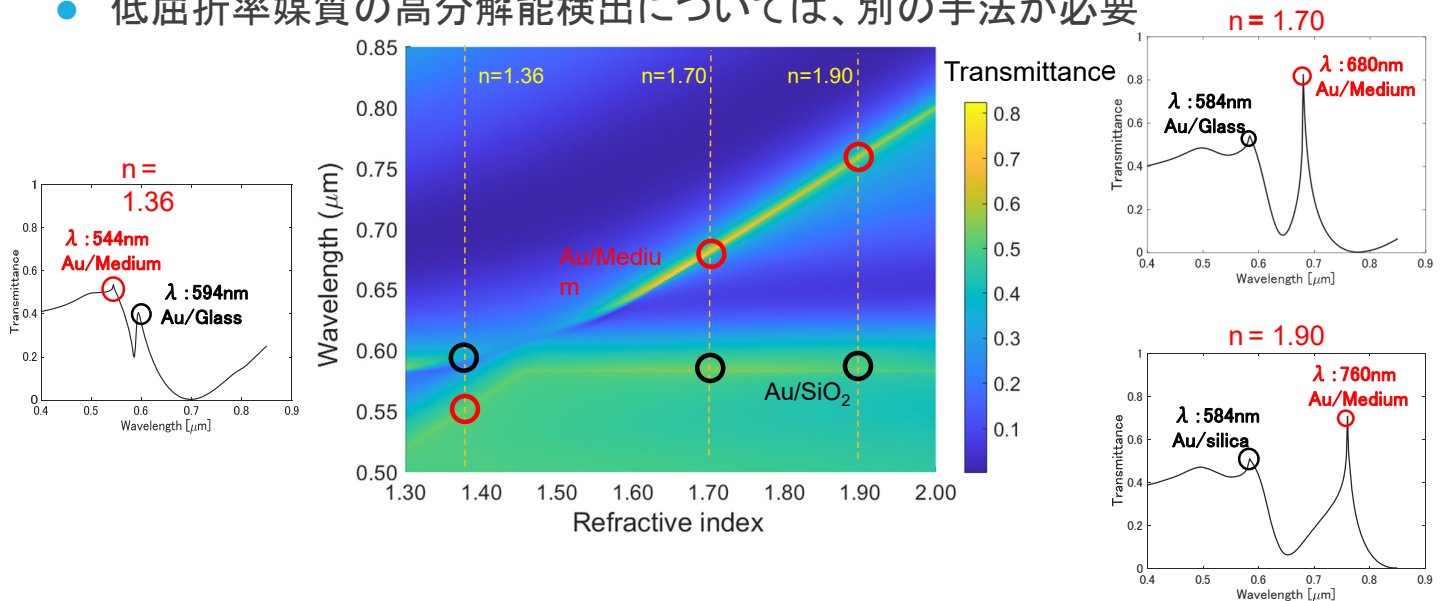
- レイリーアノマリーによって引き起こされる x 方向の電界によって金属エッジに電気双極子が生成され、局在型表面プラズモンが励起される。



- 電気双極子は z 方向の電場を生成し、定在する伝搬型表面プラズモンと局在表面プラズモンがの結合したファノ共鳴によって異常透過が発生する。

透過率スペクトルの屈折率依存性

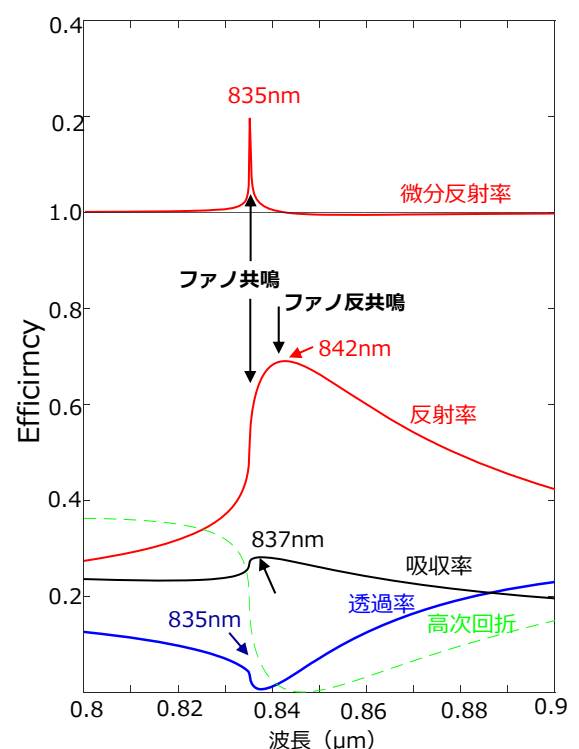
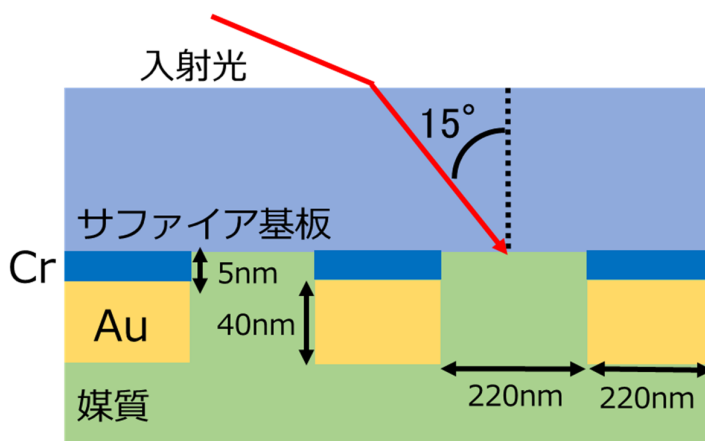
- 非伝搬モードは高屈折率媒質で有効であることが分かった。
- 低屈折率媒質の高分解能検出については、別の手法が必要



- 感度: 425 nm/RIU、FOM: 30 @n=1.70

プラズモニックファノセンサー2 (ファノ反共鳴を利用したプラズモニックファノセンサー)

- 低屈折率媒質をファノ反共鳴を利用してセンシングする。
- 微分反射率のピークが反射率の急峻な立ち上がりに対応。
- 微分反射率を使って低屈折率媒質の検出が可能



表面プラズモンセンサーのまとめ

- 金属回折格子を利用して高屈折率媒質の高感度センシングが可能になった。
- 低屈折率媒質については、現在ファノ反共鳴を利用したセンシング技術を検討中
- 発表論文
 - A. Motogaito et al., Optics Communications (2015): GaP基板
 - A. Motogaito et al., Optics and Photonics Journal (2016): 金属回折格子
 - A. Motogaito et al., Photonic Sensors (2019): 金属回折格子
 - A. Motogaito et al., Plasminics (2024): 非伝搬モード

紫外光完全吸収体

□ 研究目的

紫外光完全吸収体の実現

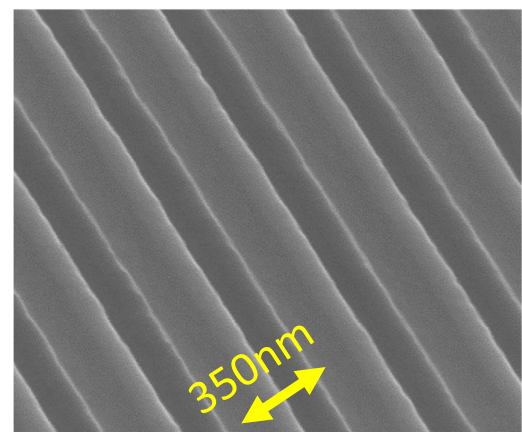
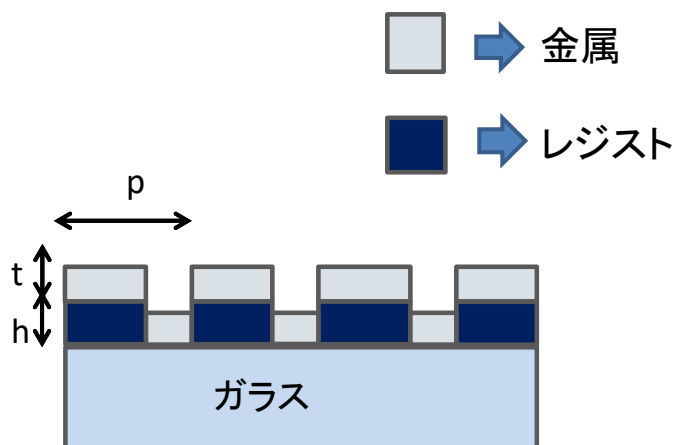
- 紫外光を用いた光通信は、低ノイズ通信技術として期待されている
- 光源と受光器の間に使用できる中間光学素子はまだ未開拓



- 波長375nmの近紫外光を任意の偏光方向に対して選択的に吸収する完全吸収体の実現
- 電磁場解析によるTM偏光とTE偏光の完全吸収のメカニズムの理論的解明

1次元金属回折格子の青色光完全吸収体

青色レーザー(波長450nm)入射



Agを用いた二層型ワイヤーグリッド構造

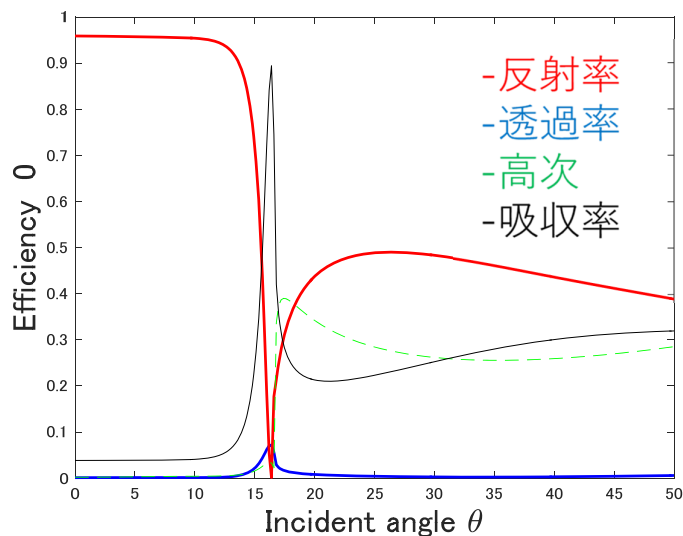
p: 周期	350nm
t: Agの厚さ	80nm
h: レジストの厚さ	100nm
duty比	= 0.75

Alを用いた二層型ワイヤーグリッド構造

p: 周期	350nm
t: Alの厚さ	80nm
h: レジストの厚さ	100nm
duty比	= 0.35

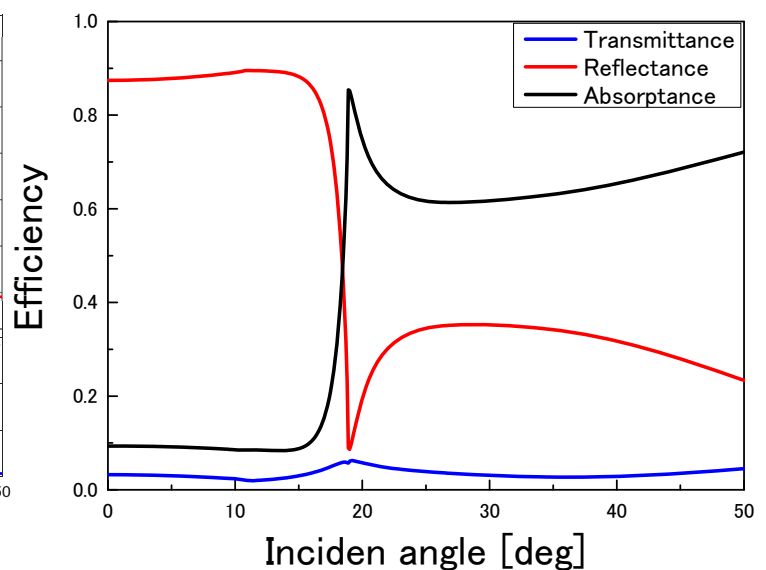
青色レーザ450nmでの吸収スペクトル

シミュレーション値



吸収率ピーク 16.4° 最大吸収率91.2%

実験値

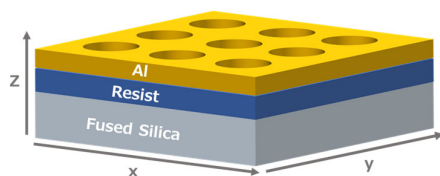


吸収率ピーク 18.9° 最大吸収率85.4%

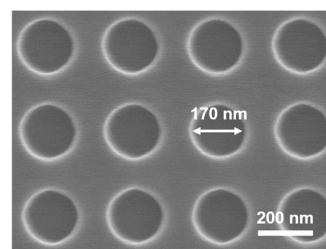
実験内容

Experiment content

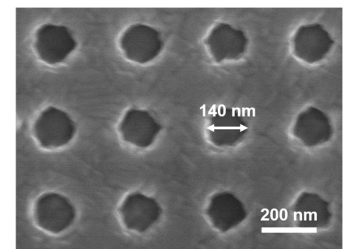
□ 厳密結合波理論(RCWA)法を用いた設計



- 光波長：375nm
- 構造周期：300nm
- ホール半径：85nm
- Al膜厚：80nm
- レジスト厚：100nm



レジストパターンの表面



Al蒸着した表面

ほぼ設計通りの構造を作製することが出来た

□ Alナノホールアレイ構造の作製手順

①

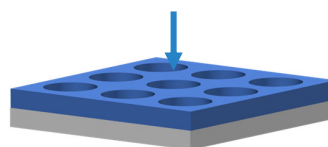
HMDS・レジスト・帯電防止剤



石英ガラス基板

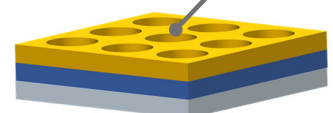
②

電子線



③

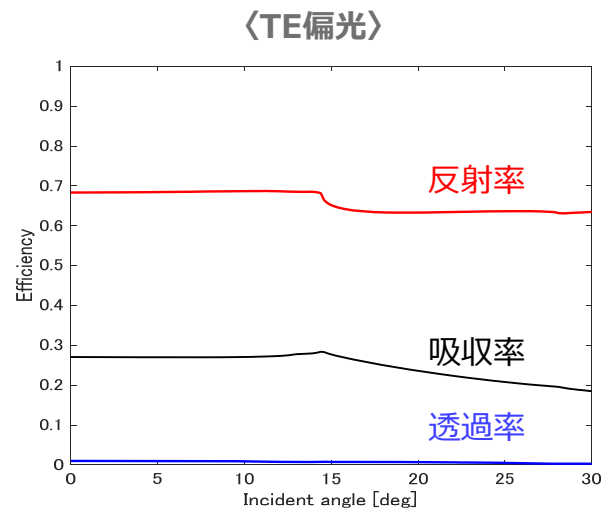
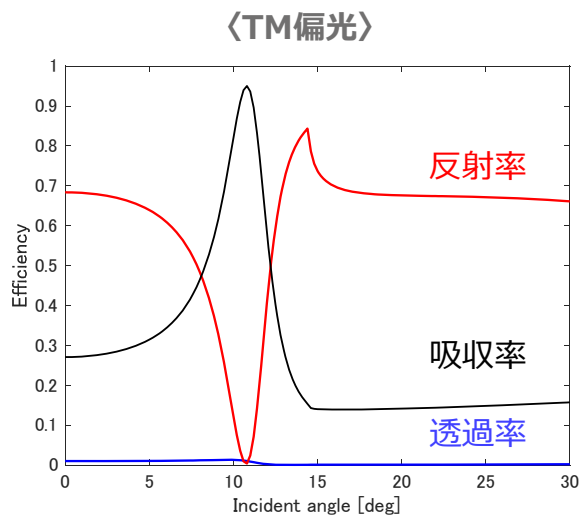
Al



実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 入射角度依存性(方位角0°)

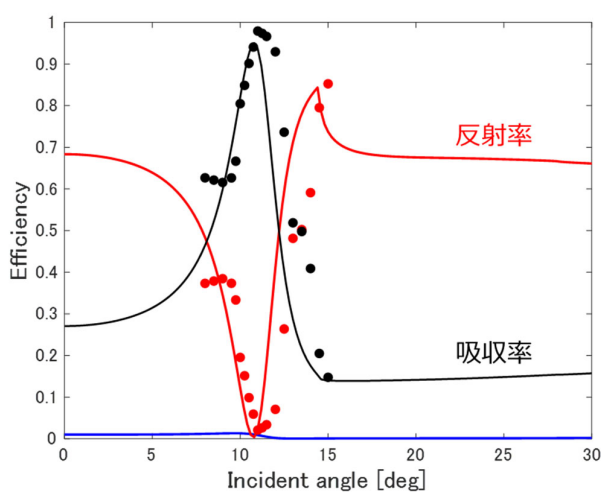


TM偏光→入射角度：10.8°， 最大吸収率：95.0%

実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 方位角0°,TM偏光を入射した時の入射角度依存性結果



吸収率と反射率の入射角度依存性

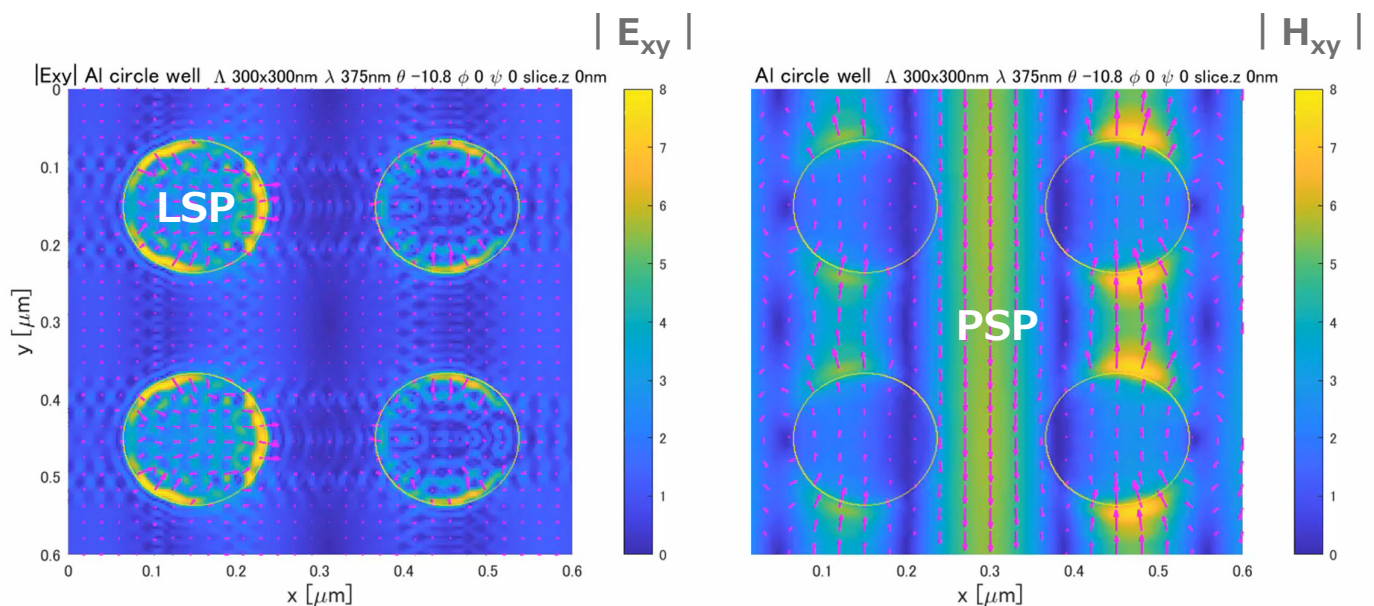
測定値		理論値	
入射角度	吸収率	入射角度	吸収率
10.5 deg	89.6 %	10.8 deg	95.0 %
11.0 deg	97.9 %		
10.5 deg	88.3 %		

- 入射角度10.8°において，最大吸収率 95.0%のピークがある（理論値）
- 実験でも，10.8°付近において，高い吸収率のピークが確認できた
- 誤差は構造の揺らぎによるものである

実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 吸収現象のメカニズム



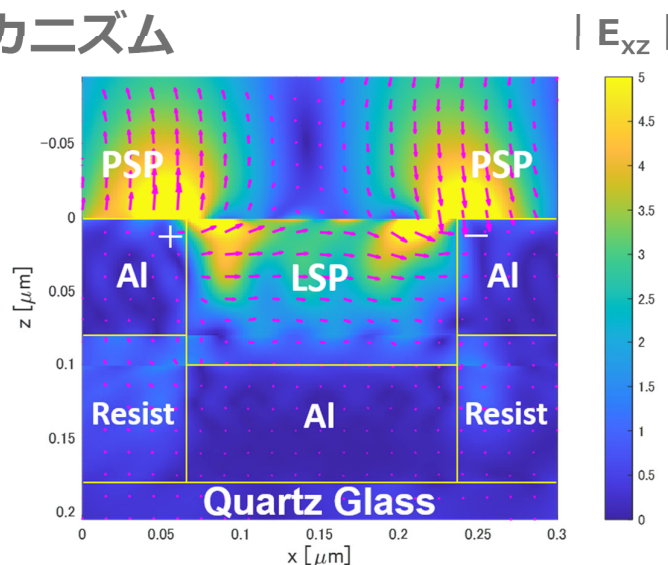
LSP(局在型表面プラズモン)が発生

PSP(伝搬型表面プラズモン)が発生

実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 吸収現象のメカニズム



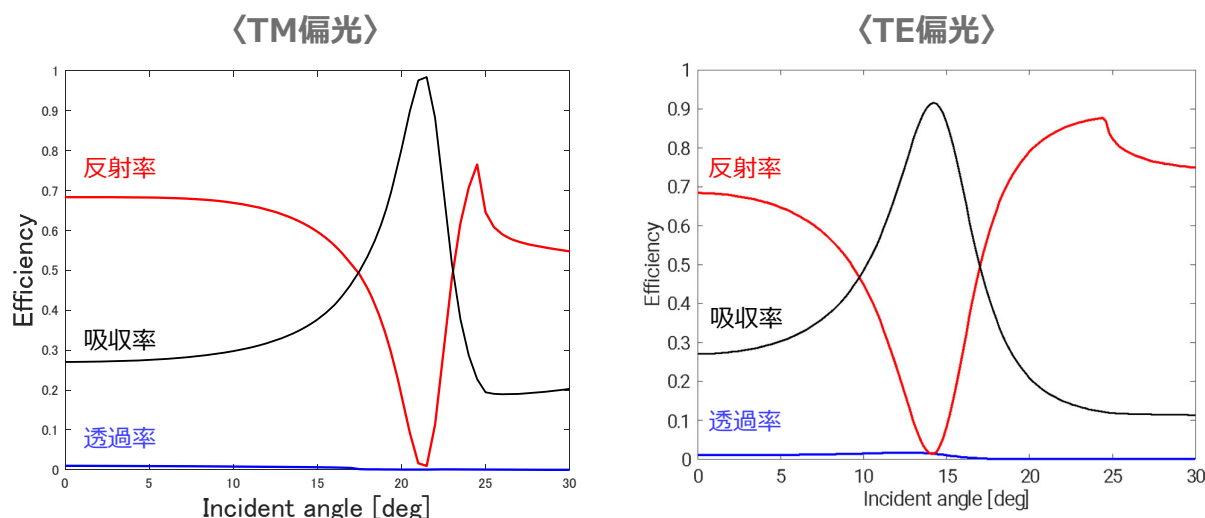
Alナノホールアレイのx-z平面の電場ベクトル分布図

- ① x 方向の電場によって局在型表面プラズモン(LSP)が励起する
- ② 電気双極子が z 方向電場を介し、伝搬型表面プラズモン(PSP)と結合する
- ③ LSPとPSPが結合したことにより、ファノ共鳴が引き起こされる

実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 入射角度依存性(方位角45°)



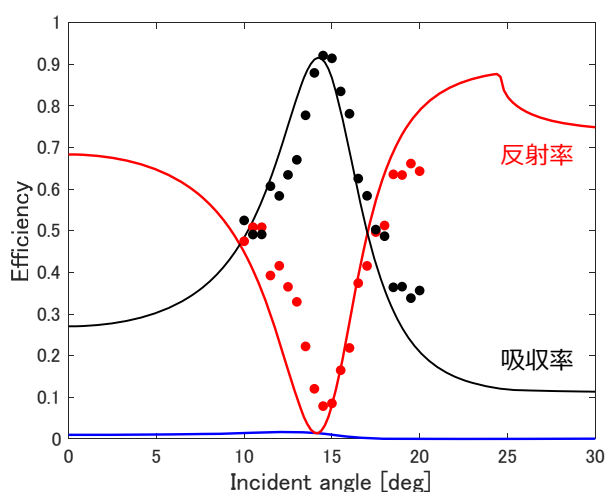
TM偏光→入射角度 : 21.0°, 最大吸収率 : 98.5%

TE偏光→入射角度 : 14.2°, 最大吸収率 : 91.5%

実験結果・考察

Experimental results and discussion

□ 方位角45°,TE偏光を入射した時の入射角度依存性結果



吸収率と反射率の入射角度依存性

測定値		理論値	
入射角度	吸収率	入射角度	吸収率
14.5 deg	91.4 %	14.2 deg	91.5 %

- 入射角度14.2°において, 最大吸収率 91.5%のピークがある (理論値)
- 実験でも, 14.2°付近において, 高い吸収率のピークが確認できた
- 誤差は構造の揺らぎによるものである

紫外光完全吸収体のまとめ

- Alナノホールアレイを作製し、波長375nmにおける偏光方向を選択可能な完全吸収体を作製した。
- 方位角を制御することで、TM偏光だけでなく、TE偏光の光も選択的に吸収できることを明らかにした。
- 波長と偏光方向の選択的光吸収を利用したスイッチング素子を考案中。
- 発表論文
 - A. Motogaito et al., Journal of European Optical Society- Rapid Publications (2021): 1次元金属回折格子, 青色完全吸収体
 - K. Akatsuka et al., Applied Physics B (2024): 2次元金属回折格子, 近紫外光完全吸収体