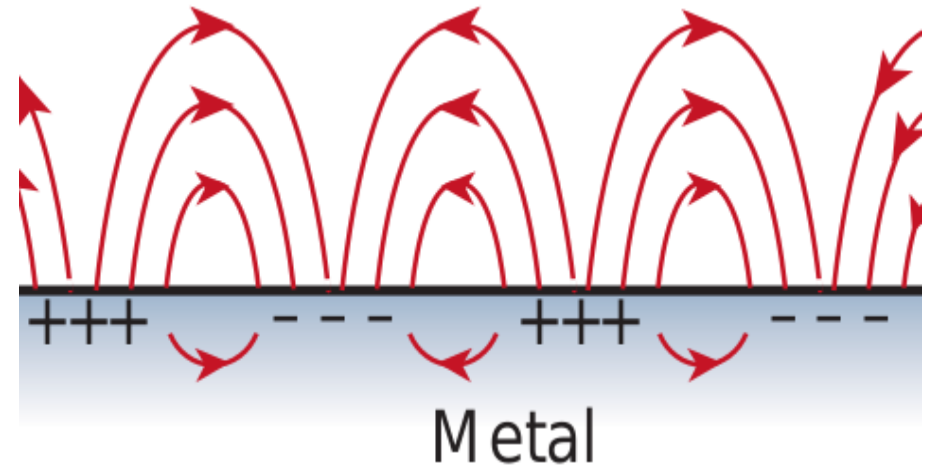


中赤外域における 伝搬型表面プラズモンの 励起と伝搬長測定

平松信義
東京大学工学部物理工学科 3 年
2015 年 8 月 21 日

伝搬型表面プラズモン (SPP: Surface Plasmon Polariton) とは

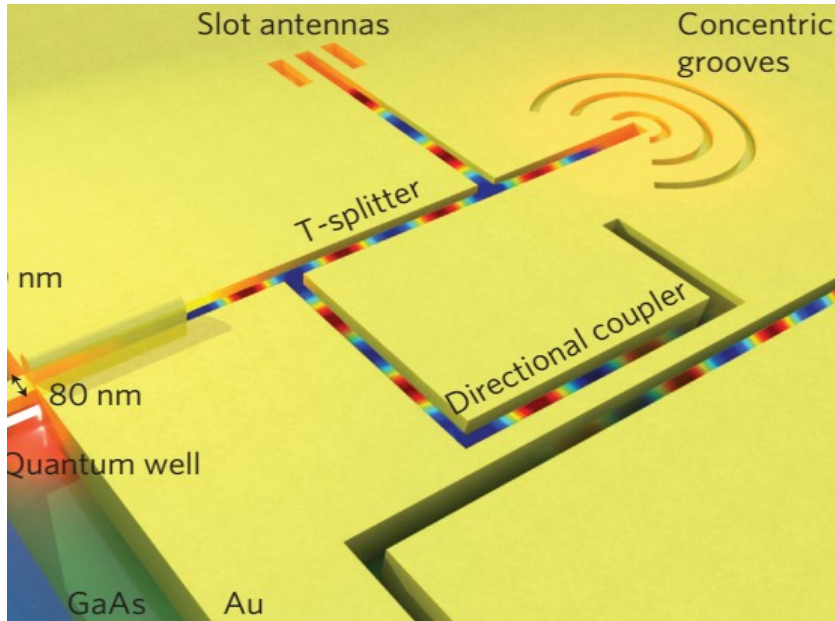
金属表面での電磁波と
自由電子の粗密波の連成波



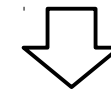
化学・生物学・材料科学分野への応用は広く行われている

Keyword: 分子認識、超薄膜のイメージング、たんぱく質の検出、表面増強ラマン分光

光導波路としての応用



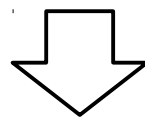
光の回折限界以下の領域にエネルギーを閉じ込めることができる



ナノメートルオーダーまで微細化された光集積回路が実現可能に

K. C. Y. Huang, et al., Nature photonics, 8, 244(2014)

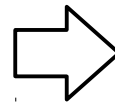
- これまでの研究は可視域で行われてきた
- 中赤外域 (波長 $3\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$) では長く伝搬することが予想される



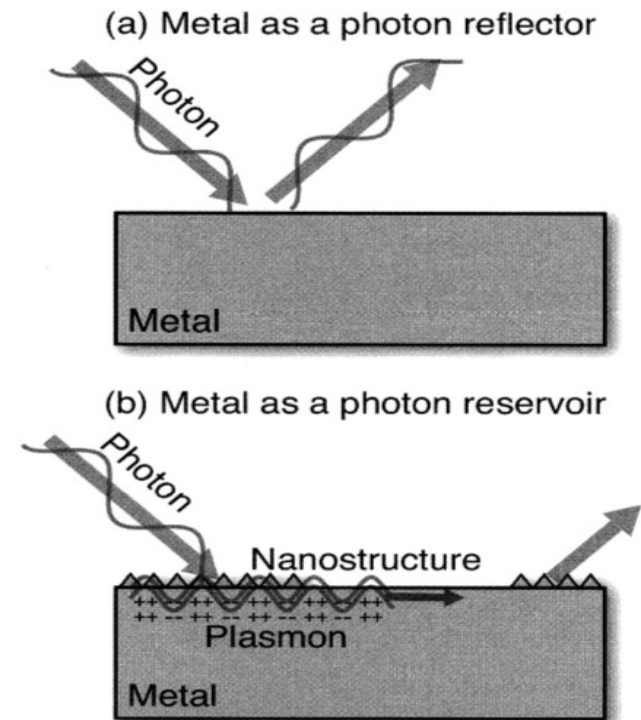
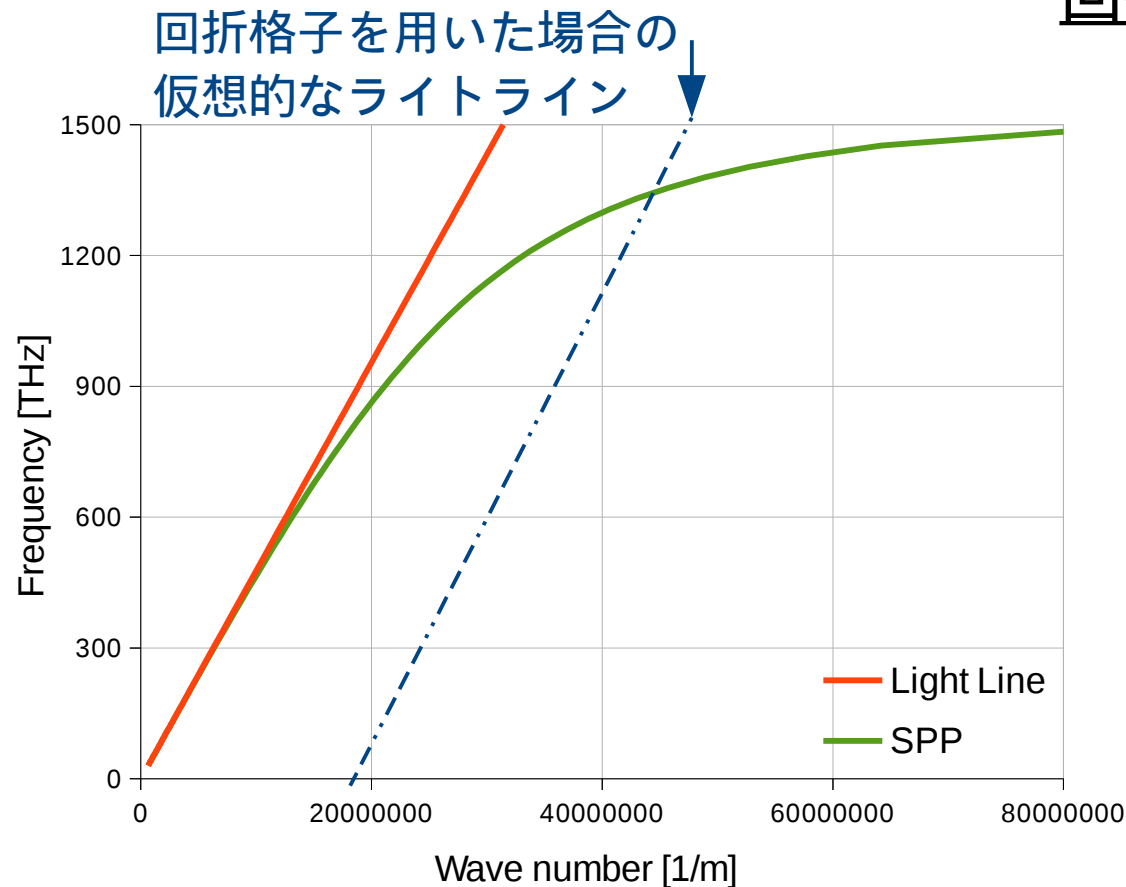
目的：中赤外域での SPP を励起し伝搬長を求める

SPP の励起方法

SPP の分散曲線と伝搬光の分散曲線は交点を持たない



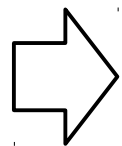
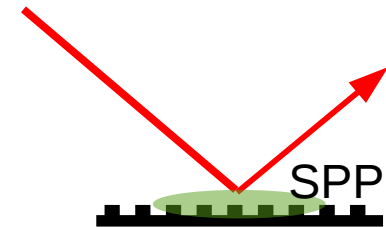
伝搬光と SPP は通常結合しないが、回折格子によって結合できる



SPP の励起の確認

アノマリ（回折異常）とは特定の入射角での回折強度に特異的な変化が起こること

- プラズモン共鳴アノマリ
SPP を励起できる条件でおこる
◎P 偏光で如実



アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

予備実験：可視域での SPP 励起

15 次回折光強度の入射角依存性 (He-Ne レーザー)

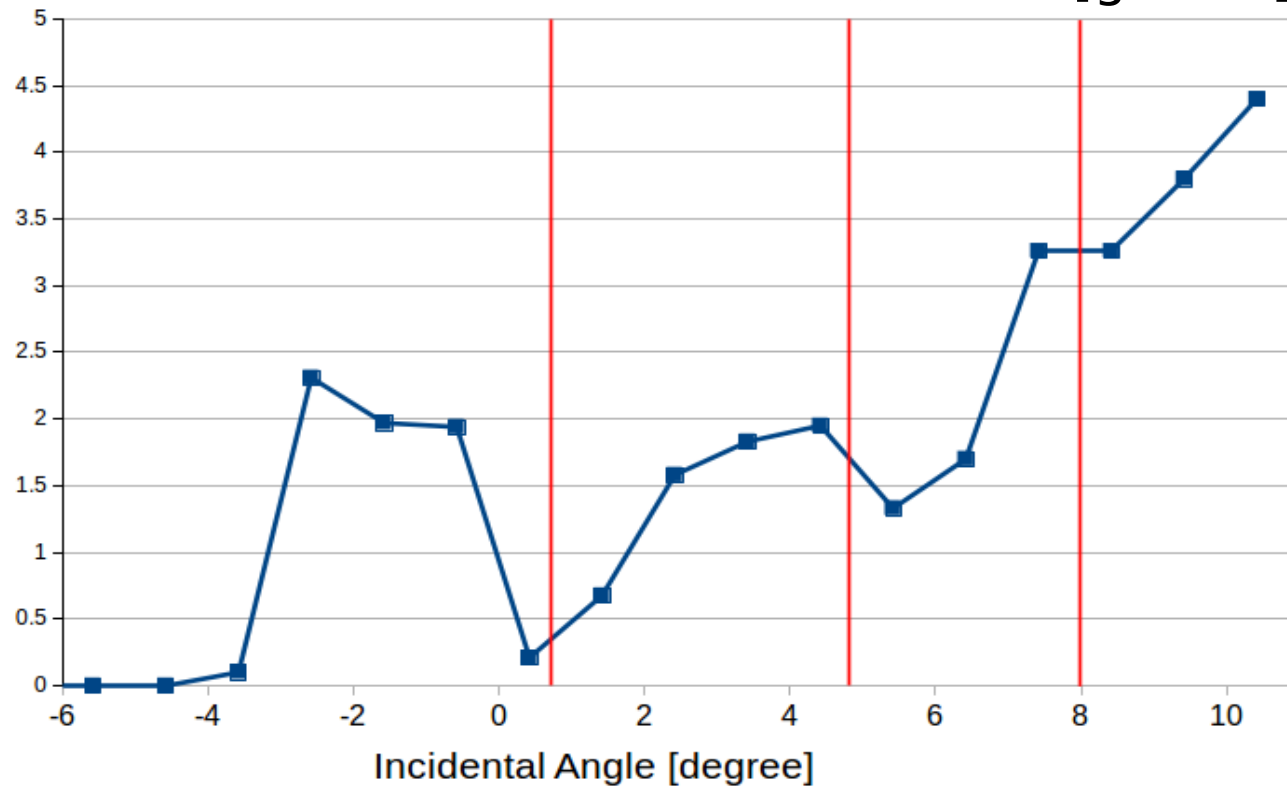
波長：632.8[nm]

グレーティング密度：100[gr/mm]

要検討

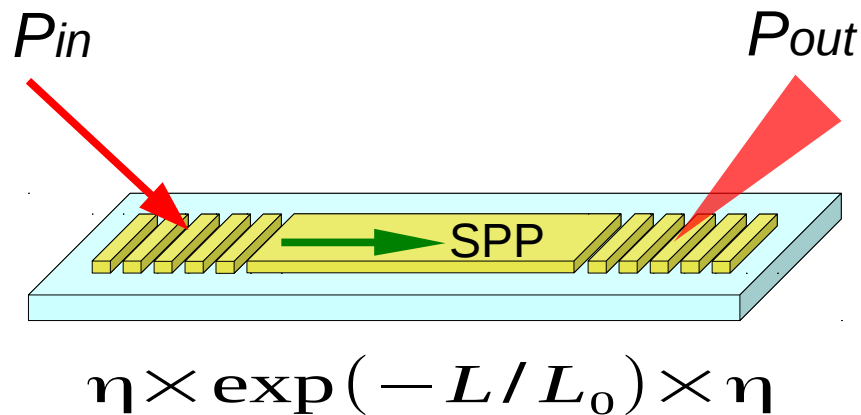
回折光強度に特異的な溝が発生している

→ 回折光のエネルギーが SPP の励起に使われた

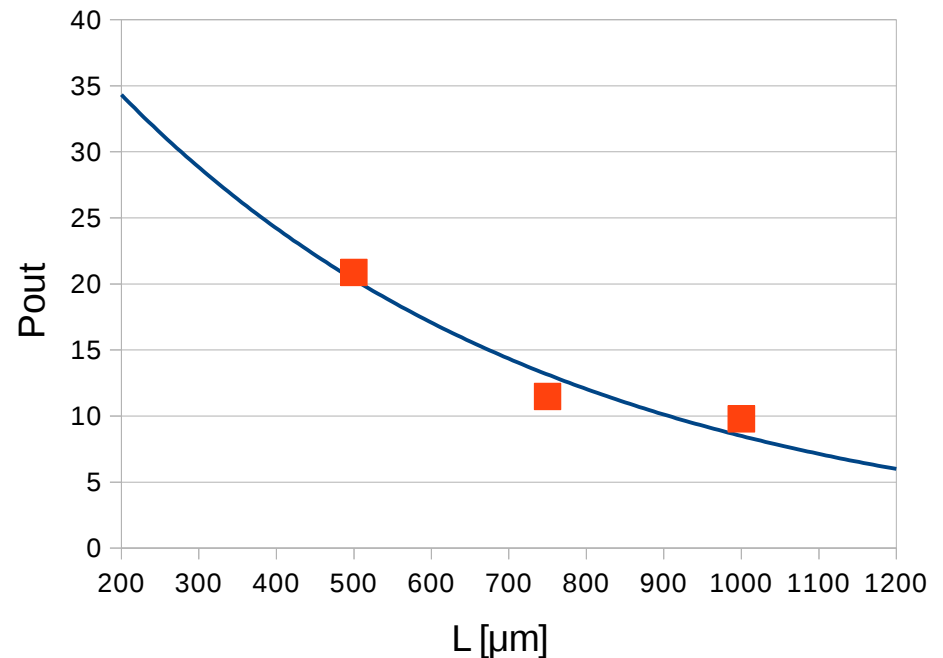
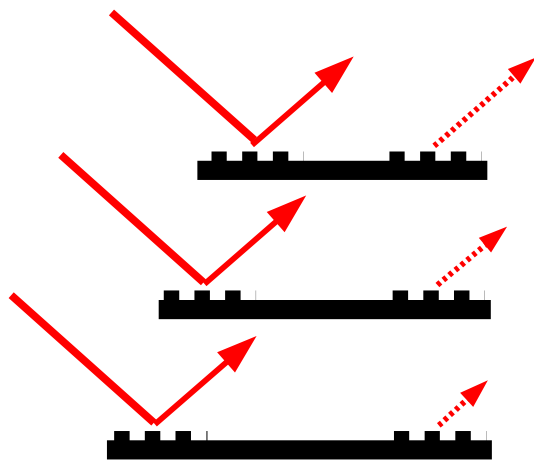


理論で予想される条件

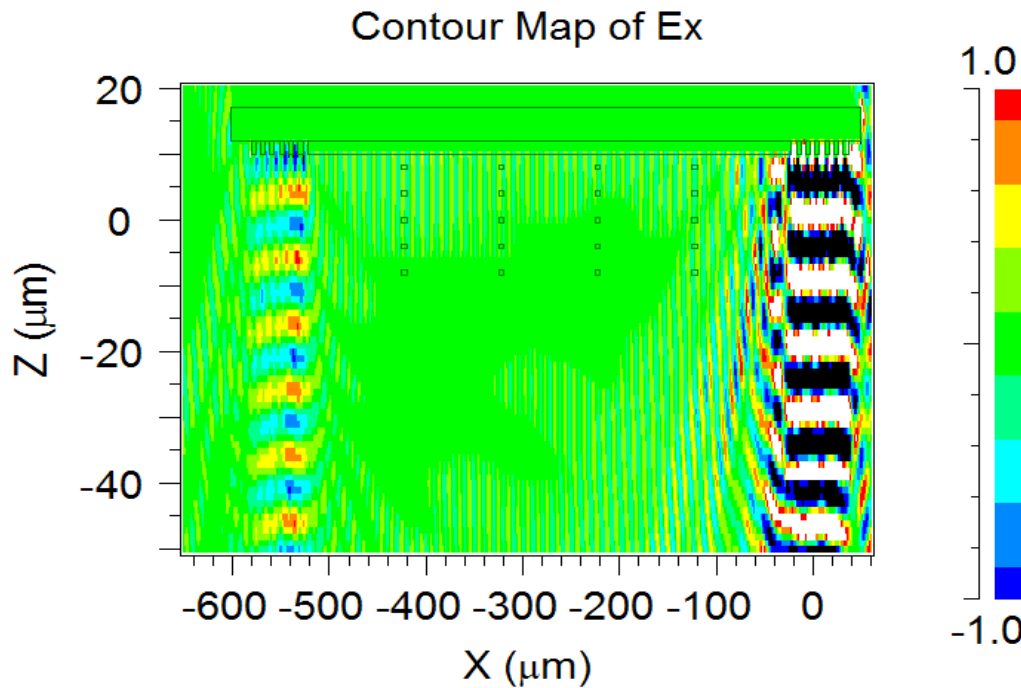
SPP 伝搬長の測定方法



長さの異なる導波路をいくつか作成し、出力光強度 P_{out} を比較することにより伝搬長 L_0 を計算

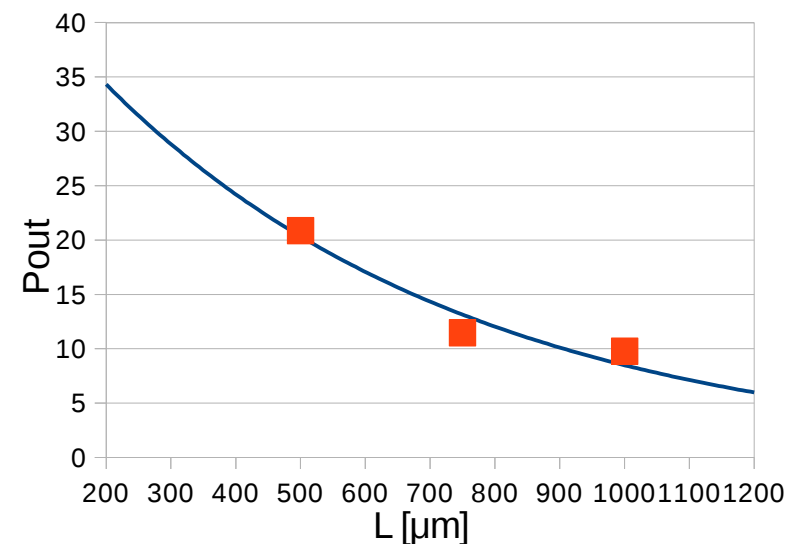


電磁界解析 (FDTD 法)



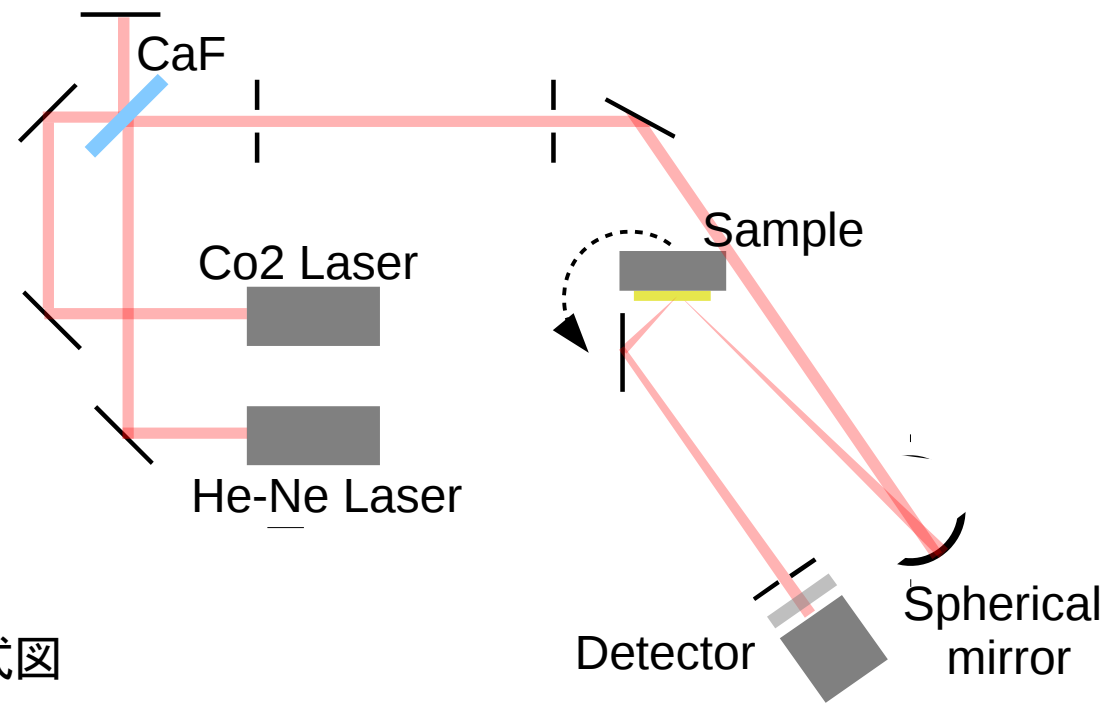
入射光に対する検出光の
電場強度比は最大 20%

SPP からの散乱光は
検出可能だと考えた

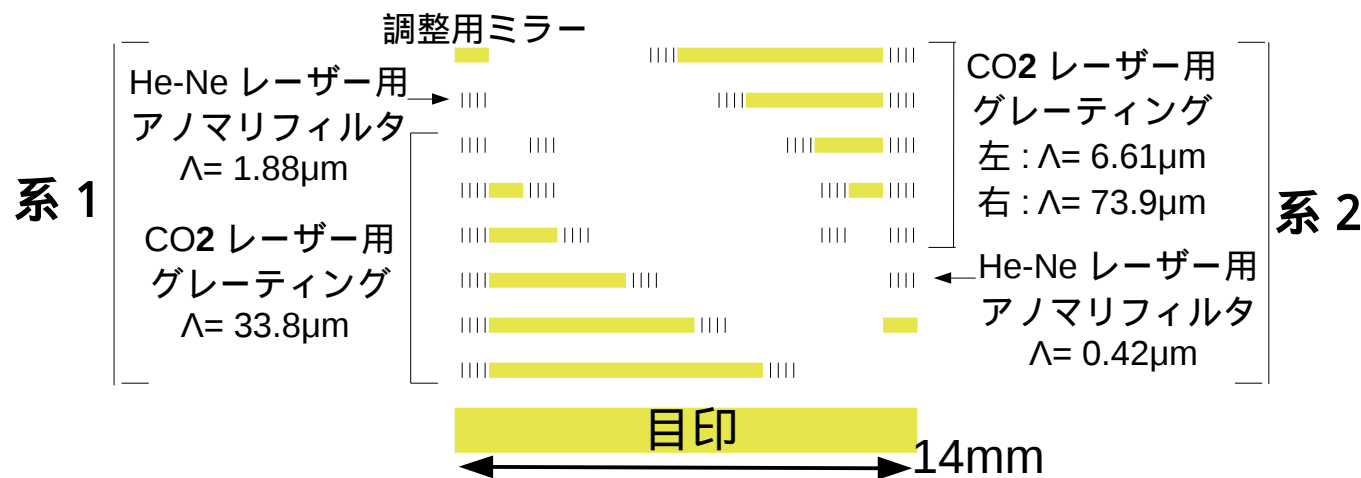


実験装置の作成

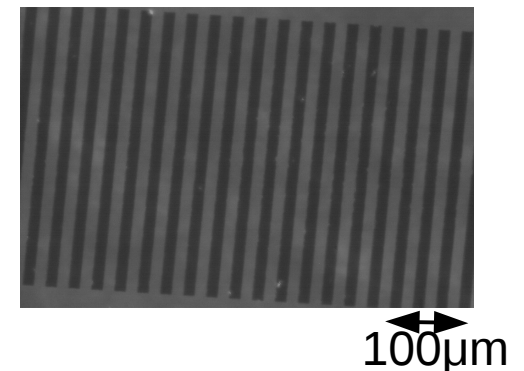
- SPP の励起と検出を行うための光学系を作成した
- 電子線描画装置を用いて ZnS 基盤上に導波路構造を作成した



導波路構造の模式図

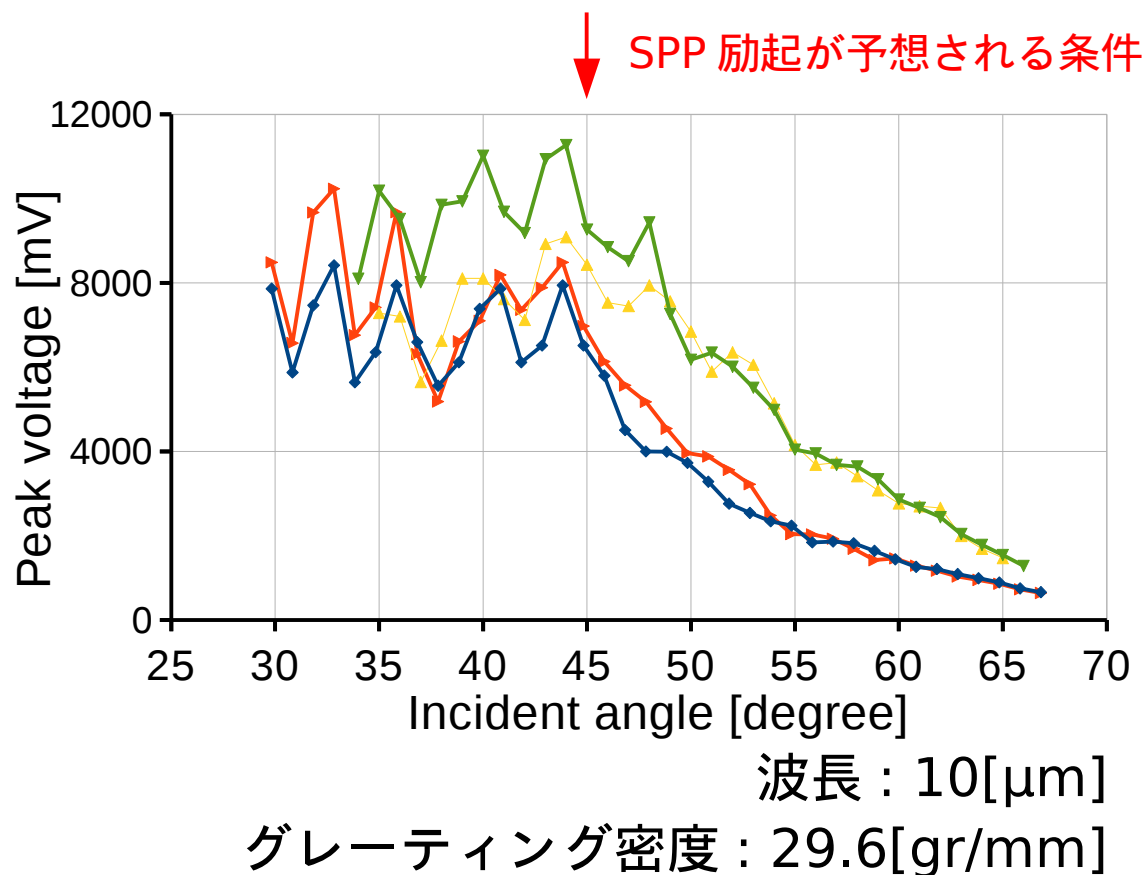


密度: 29.6[gr/mm] の回折格子についての顕微鏡写真



SPP 励起の確認

反射光強度の入射角依存性

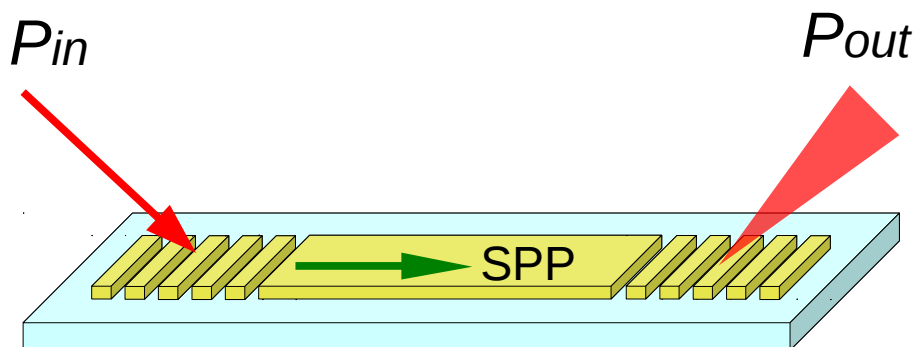


SPP 励起に起因する反射率の低下は見られなかった

考察

- 厚みが薄いことによる金薄膜内部の透過と干渉がノイズとして大きい
- 反射光ではなく -2 次の回折光でアノマリが発生している可能性がある

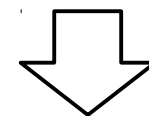
散乱光 P_{out} の検出



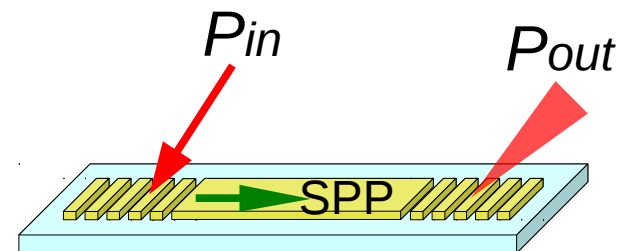
散乱光 P_{out} は検出できなかった

考察

- SPP の励起に適切な角度で赤外光の入射が行えていなかった可能性がある
- 光束入射位置の精度が良くなかった可能性がある
- 入射光の反射が散乱光 P_{out} を覆い隠してしまっていた可能性がある



入射光の反射が無視できる配置で再度、慎重に実験を行う



まとめ、今後の展望

まとめ

- 回折格子を用いて可視域での SPP の励起を確認した
- 電磁界シミュレータを用いた解析で、SPP の励起効率と伝搬長を見積もった
- 実験デバイスと測定のための工学系を設計し、実際に作成した
- 簡単のため、反射光強度の計測による赤外域での SPP の励起実験を行ったが、SPP の励起は確認できなかった

今後の展望

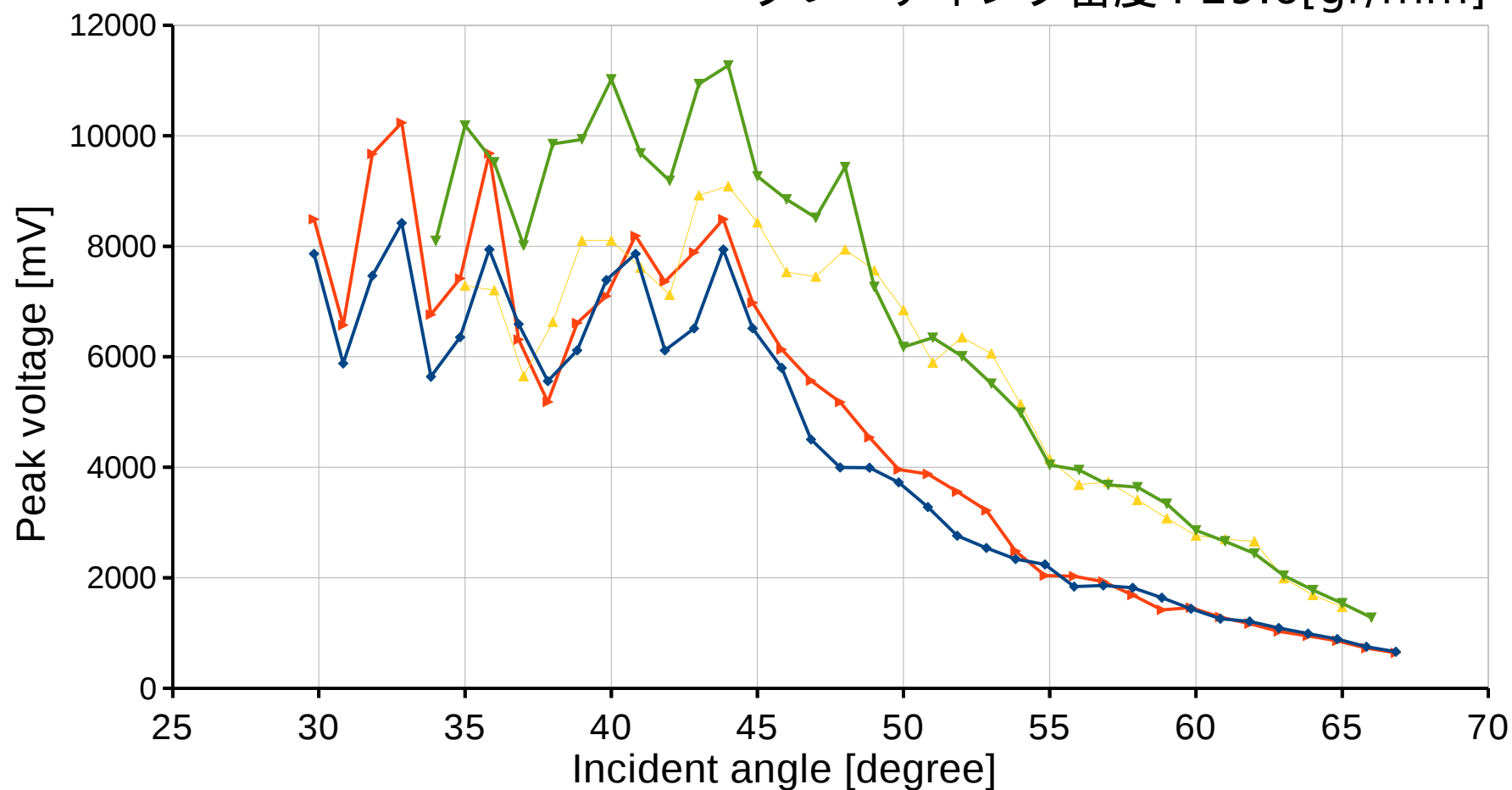
- 2 次の回折光強度を計測することにより、赤外域での SPP の励起を確認する
- 赤外域での SPP の伝搬長を測定する

補助資料

作成した試料のグレーティング構造における反射光の角度依存性

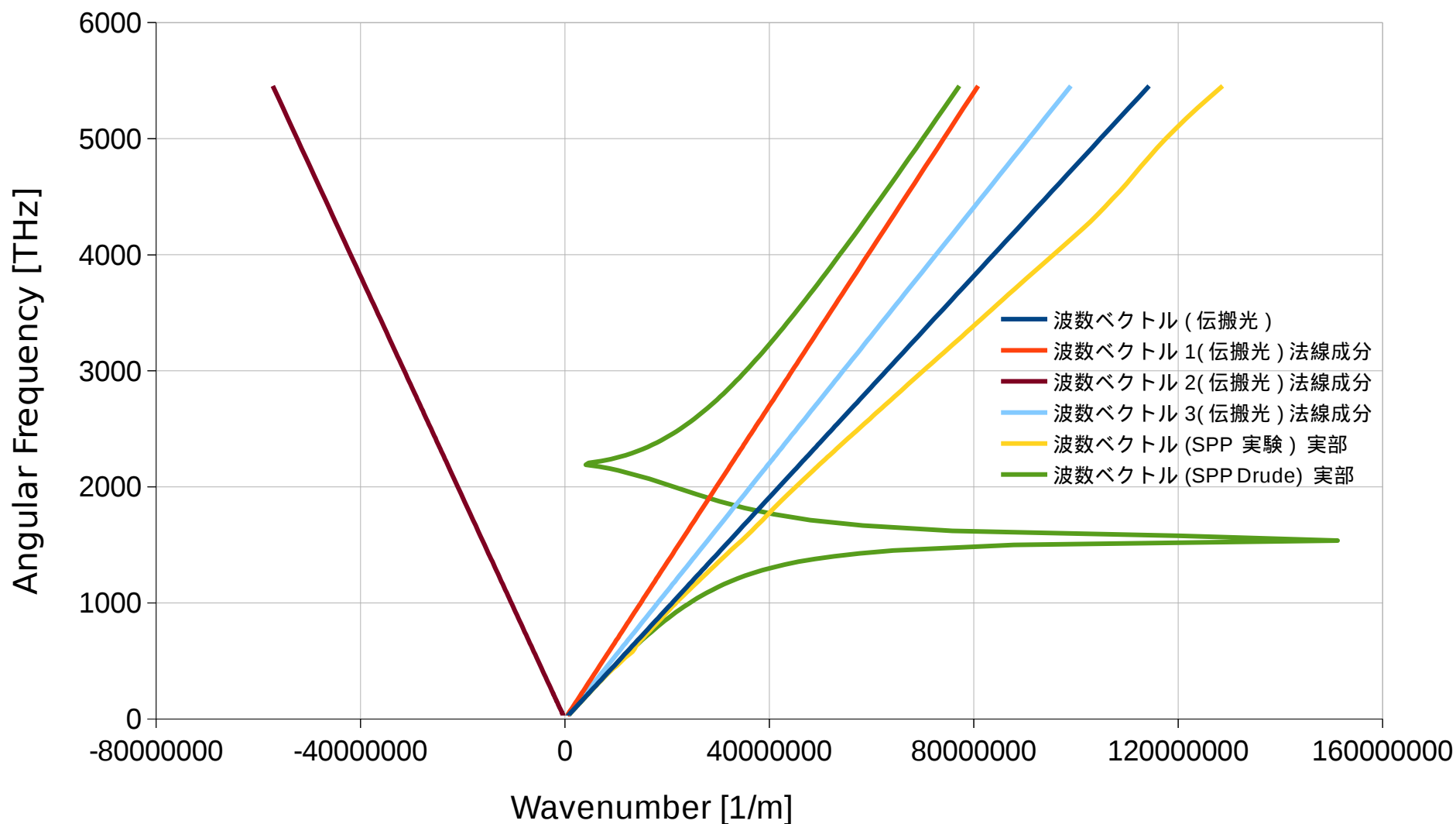
波長：10[μm]

グレーティング密度：29.6[gr/mm]



補助資料

金 - 空気間における SPP の分散関係

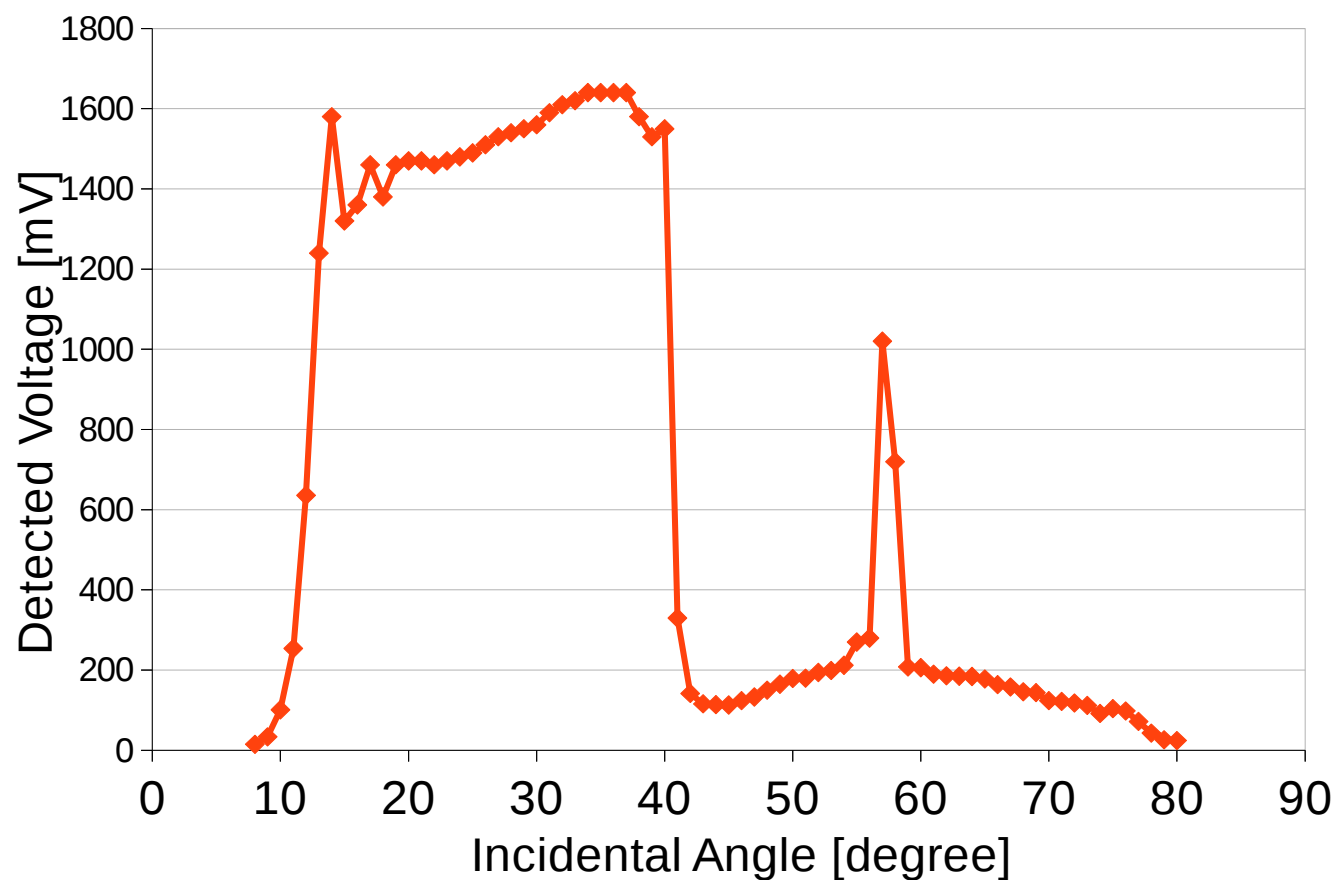


補助資料

赤外光の 0 次回折光（反射光）強度の角度依存性

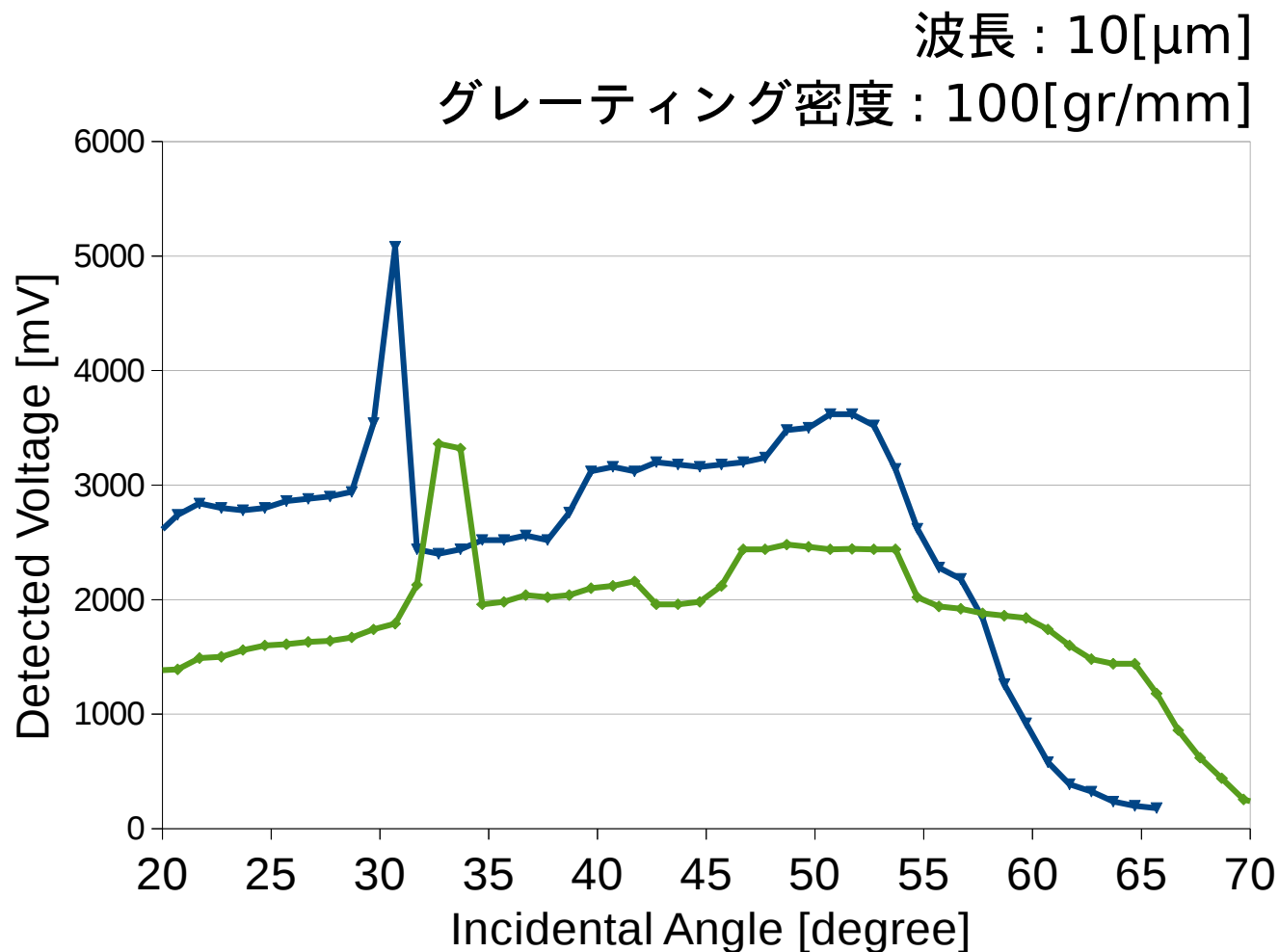
波長：10[μm]

グレーティング密度：150[gr/mm]



補助資料

0 次回折光強度の入射角依存性 (CO₂ レーザー)



要検討

回折光強度に鋭いピークができています

原理的な説明はできていない

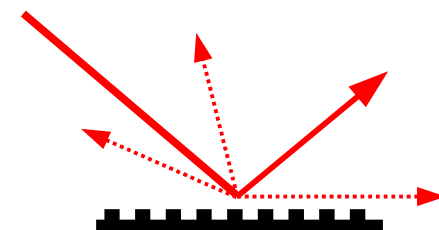
補助資料

アノマリ（回折異常）とは特定の入射角での回折強度に特異的な変化が起こること

- **wood** のアノマリ

回折光が界面に平行に出るときにおこる

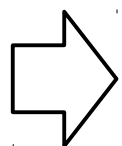
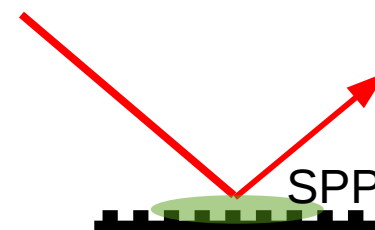
◎S 偏光で如実



- **プラズモン共鳴アノマリ**

SPP を励起できる条件でおこる

◎P 偏光で如実

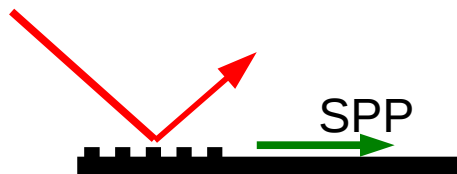


アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

補助資料

SPP の励起方法： 回折格子を用いる

編集予定 ...



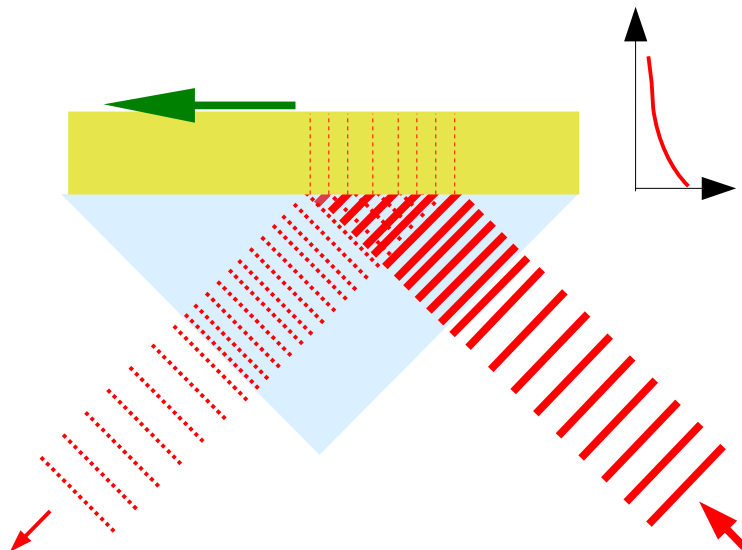
$$k_p = k_l + m k_g \quad (m \in \mathbb{Z})$$

補助資料

SPP の励起方法：Kretschmann 配置

高屈折率のプリズムを用いて伝搬光の位相速度を遅くする

プリズム - 金属界面でのエヴァネッセント光を
裏面の SPP とカップルする

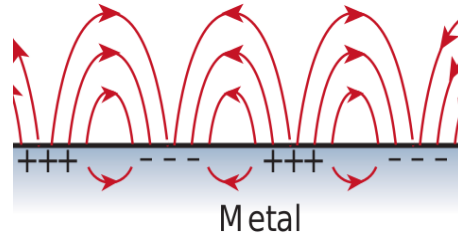


中赤外域における 伝搬型表面プラズモンの 励起と伝搬長測定

平松信義
東京大学工学部物理工学科 3 年
2015 年 8 月 21 日

伝搬型表面プラズモン (SPP: Surface Plasmon Polariton) とは

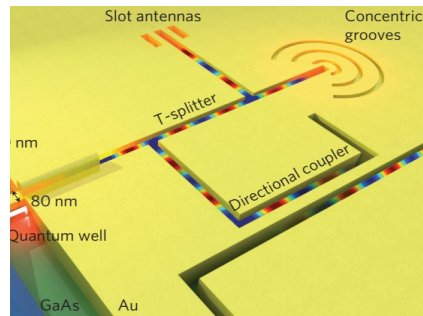
金属表面での電磁波と
自由電子の粗密波の連成波



化学・生物学・材料科学分野への応用は広く行われている

Keyword: 分子認識、超薄膜のイメージング、たんぱく質の検出、表面増強ラマン分光

光導波路としての応用



光の回折限界以下の領域にエネルギーを閉じ込めることができる



ナノメートルオーダーまで微細化された光集積回路が実現可能に

K. C. Y. Huang, et al., Nature photonics, 8, 244(2014)

- これまでの研究は可視域で行われてきた
- 中赤外域 (波長 $3\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$) では長く伝搬することが予想される



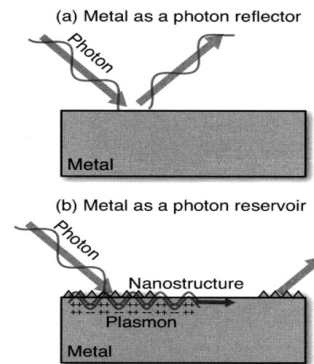
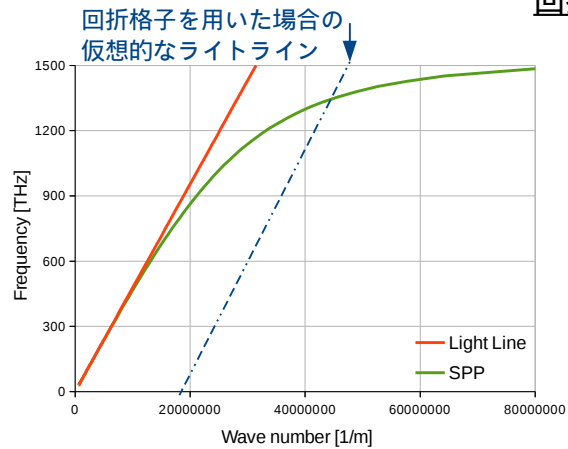
目的：中赤外域での SPP を励起し伝搬長を求める

SPP の励起方法

SPP の分散曲線と伝搬光の分散曲線は交点を持たない



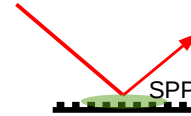
伝搬光と SPP は通常結合しないが、回折格子によって結合できる



SPP の励起の確認

アノマリ（回折異常）とは特定の入射角での回折強度に特異的な変化が起こること

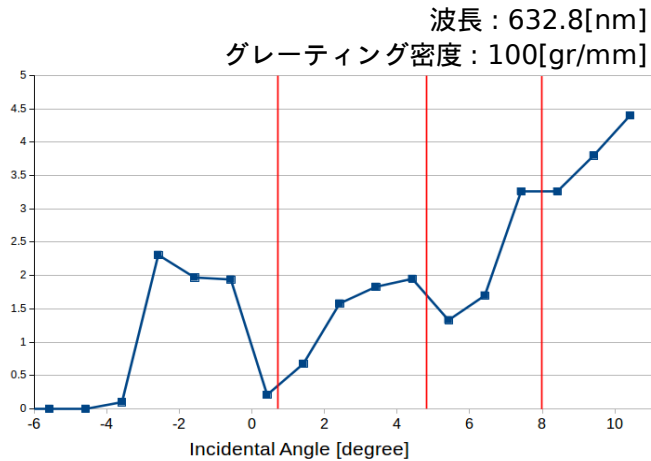
- プラズモン共鳴アノマリ
SPP を励起できる条件でおこる
◎P 偏光で如実



アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

予備実験：可視域での SPP 励起

15 次回折光強度の入射角依存性 (He-Ne レーザー)



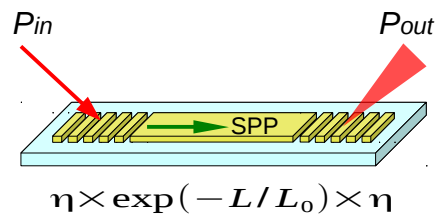
要検討

回折光強度に特異的な溝が発生している

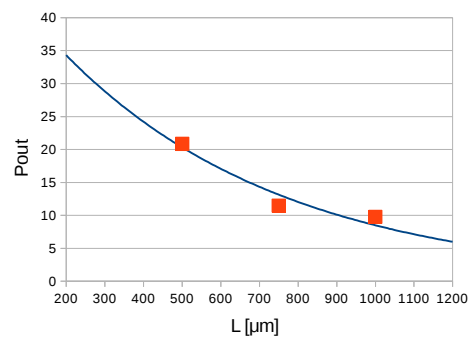
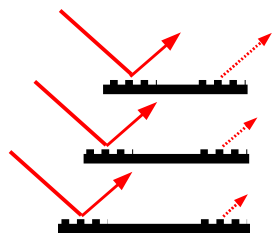
→ 回折光のエネルギーが SPP の励起に使われた

理論で予想される条件

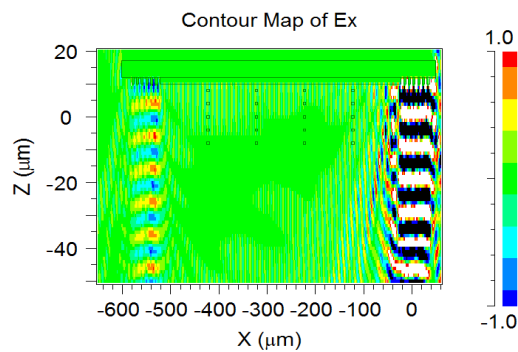
SPP 伝搬長の測定方法



長さの異なる導波路をいくつか作成し、出力光強度 P_{out} を比較することにより伝搬長 L_0 を計算

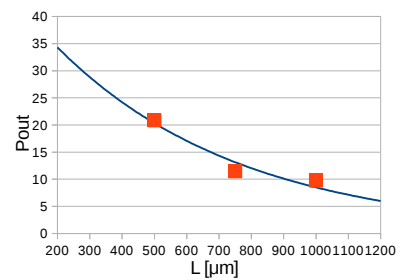


電磁界解析 (FDTD 法)



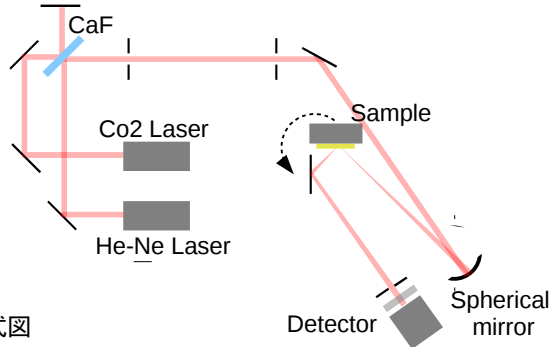
入射光に対する検出光の
電場強度比は最大 20%

SPP からの散乱光は
検出可能だと考えた

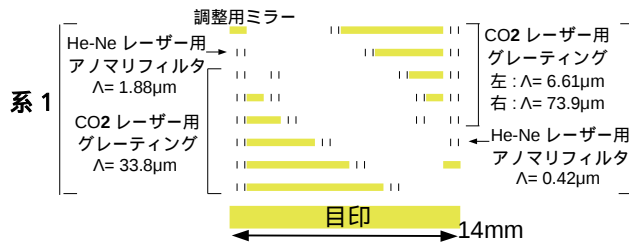


実験装置の作成

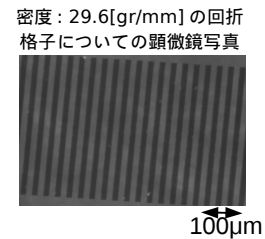
- SPP の励起と検出を行うための光学系を作成した
- 電子線描画装置を用いて ZnS 基盤上に導波路構造を作成した



導波路構造の模式図

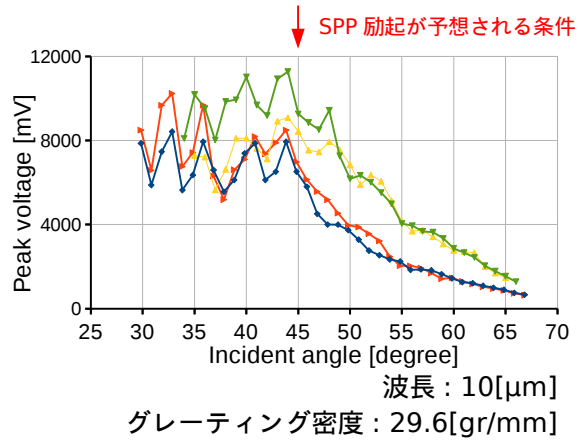


系 2



SPP 励起の確認

反射光強度の入射角依存性

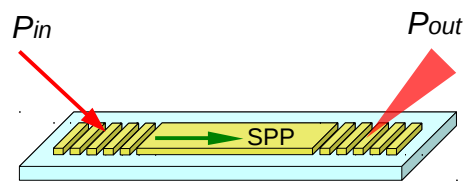


SPP 励起に起因する反射率の低下は見られなかった

考察

- 厚みが薄いことによる金薄膜内部の透過と干渉がノイズとして大きい
- 反射光ではなく -2 次の回折光でアノマリが発生している可能性がある

散乱光 P_{out} の検出



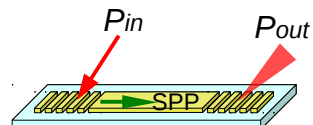
散乱光 P_{out} は検出できなかった

考察

- SPP の励起に適切な角度で赤外光の入射が行えていなかった可能性がある
- 光束入射位置の精度が良くなかった可能性がある
- 入射光の反射が散乱光 P_{out} を覆い隠してしまっていた可能性がある



入射光の反射が無視できる配置で再度、慎重に実験を行う



まとめ、今後の展望

まとめ

- 回折格子を用いて可視域での SPP の励起を確認した
- 電磁界シミュレータを用いた解析で、SPP の励起効率と伝搬長を見積もった
- 実験デバイスと測定のための工学系を設計し、実際に作成した
- 簡単のため、反射光強度の計測による赤外域での SPP の励起実験を行ったが、SPP の励起は確認できなかった

今後の展望

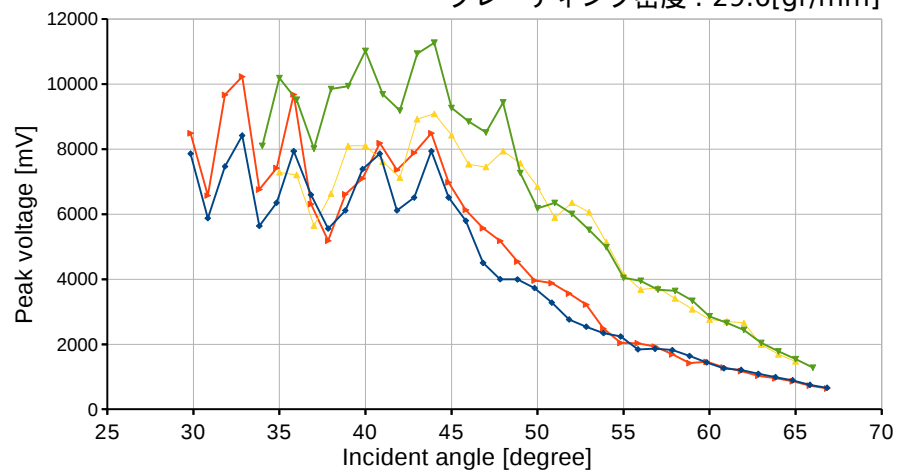
- 2 次の回折光強度を計測することにより、赤外域での SPP の励起を確認する
- 赤外域での SPP の伝搬長を測定する

補助資料

作成した試料のグレーティング構造における反射光の角度依存性

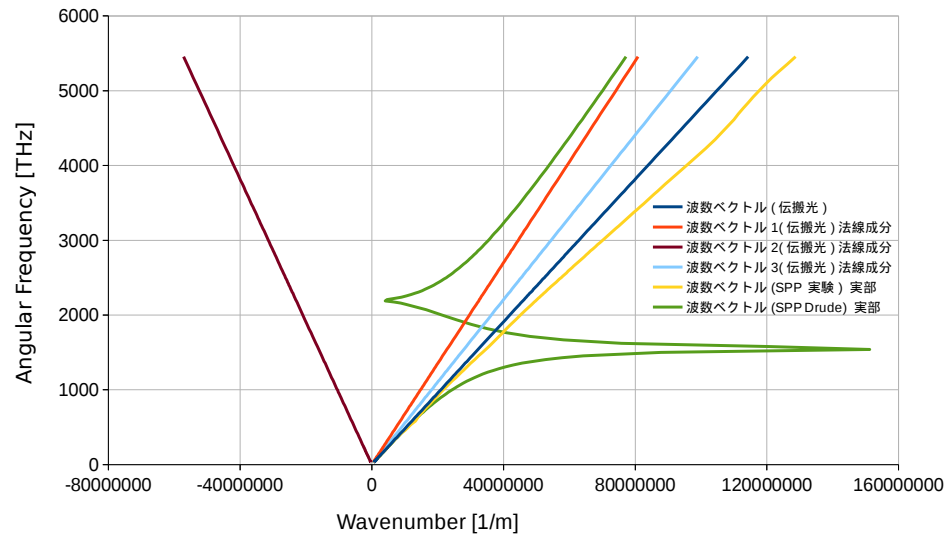
波長 : 10[μm]

グレーティング密度 : 29.6[gr/mm]



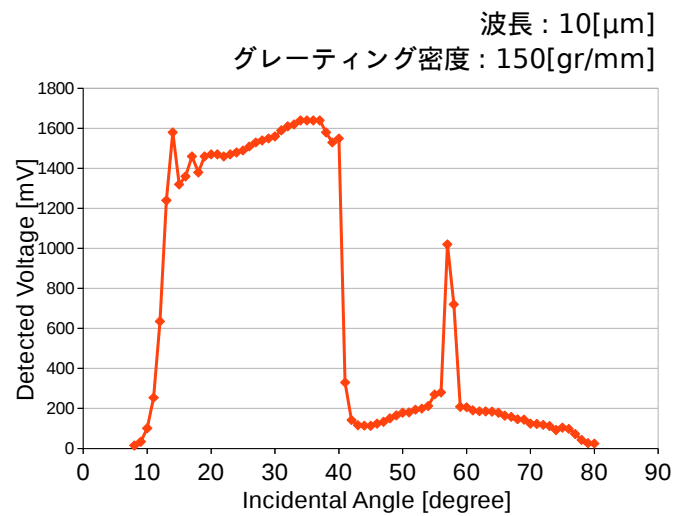
補助資料

金 - 空気間における SPP の分散関係



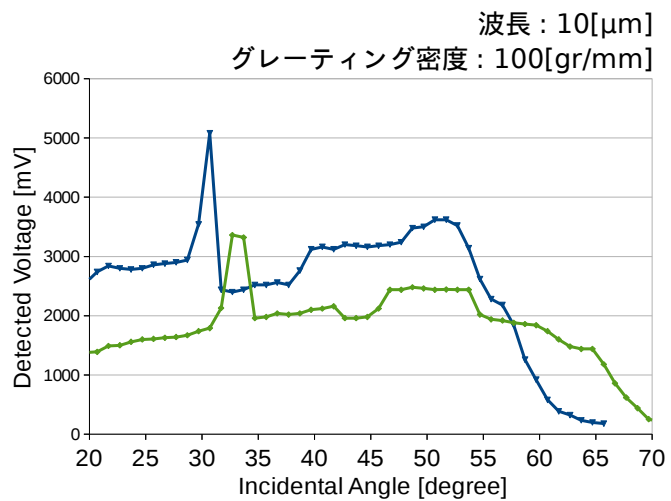
補助資料

赤外光の 0 次回折光 (反射光) 強度の角度依存性



補助資料

0 次回折光強度の入射角依存性 (CO₂ レーザー)



要検討

回折光強度に鋭いピークができています

原理的な説明はできていない

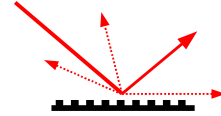
補助資料

アノマリ（回折異常）とは特定の入射角での回折強度に特異的な変化が起こること

- **wood** のアノマリ

回折光が界面に平行に出るときにおこる

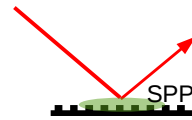
◎S 偏光で如実



- **プラズモン共鳴アノマリ**

SPP を励起できる条件でおこる

◎P 偏光で如実

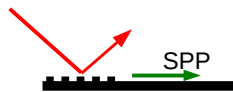


アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

補助資料

SPP の励起方法：回折格子を用いる

編集予定 ...



$$k_p = k_l + m k_g \quad (m \in \mathbb{Z})$$

補助資料

SPP の励起方法 : Kretschmann 配置

高屈折率のプリズムを用いて伝搬光の位相速度を遅くする
プリズム - 金属界面でのエヴァネッセント光を
裏面の SPP とカップルする

