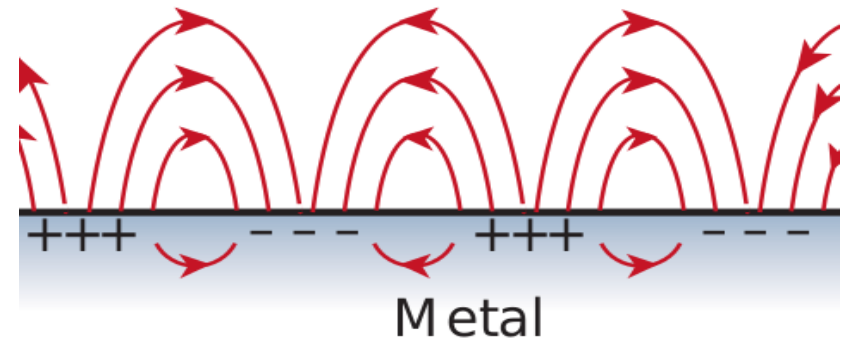


中赤外域における 伝搬型表面プラズモンの 励起と伝搬長測定

芦原研究室 / 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

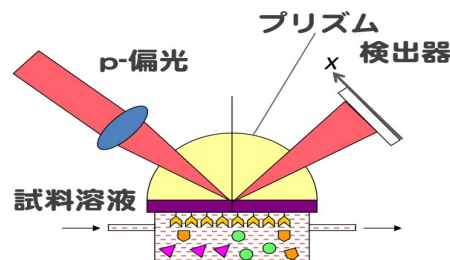
金属表面での電磁波と
自由電子の粗密波の連成波



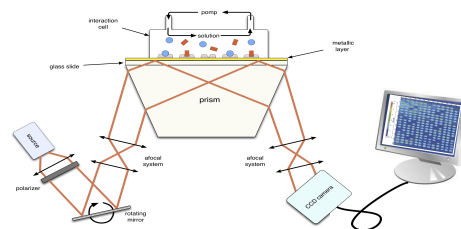
電場増強効果、空間閉じ込め効果、共鳴条件の敏感性



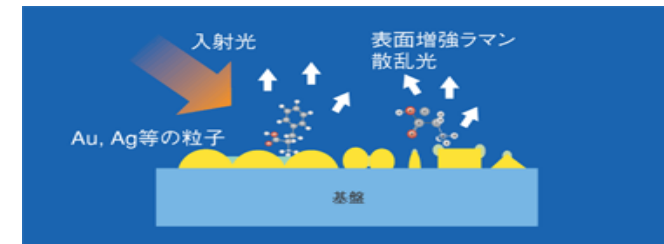
応用例：物質の高感度なセンシング（たんぱく質、超薄膜など）、
ナノイメージング、表面増強ラマン分光、光集積回路



梶川, 産総研 web 用配布資料 (2012)

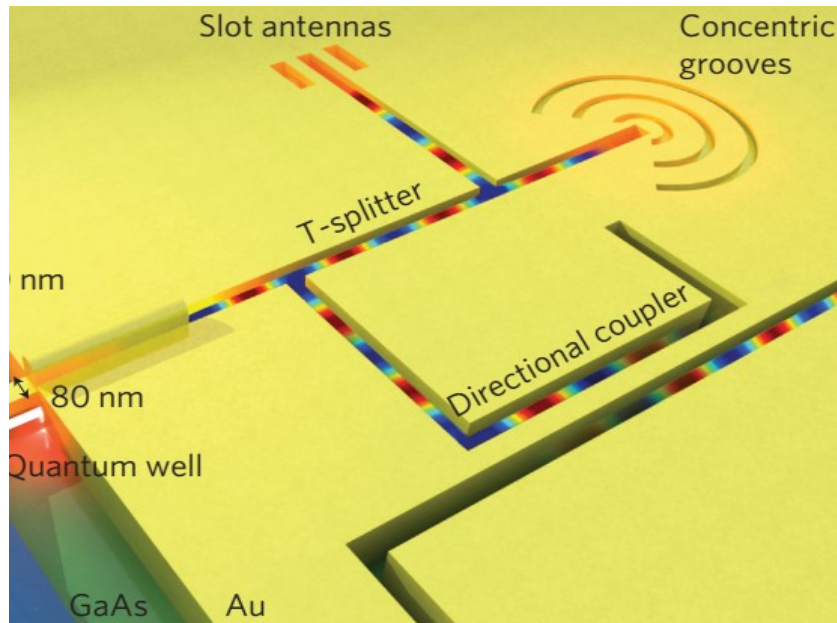


Canva Micheal, et al., Surface Plasmon
resonance Imaging, photonics4life(2010)

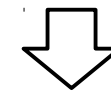


浜松ホトニクス公式 HP 「ナノホトニクス：
基礎研究・応用研究」

本研究の目的



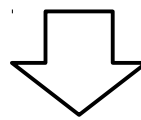
光の回折限界以下の領域にエネルギーを閉じ込めることができる



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)

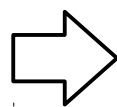
- これまでの研究は可視、近赤外域で行われてきた
- 中赤外域 (波長 $3\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$) では 10mm オーダーで長く伝搬することが予想される



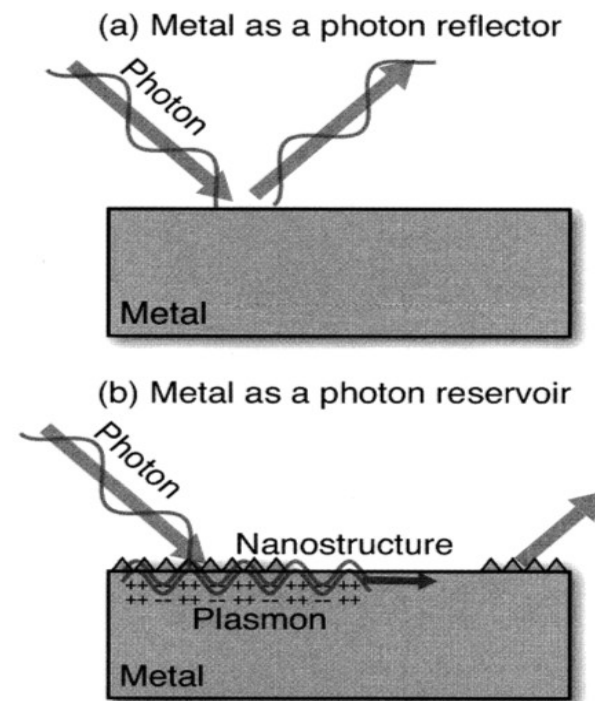
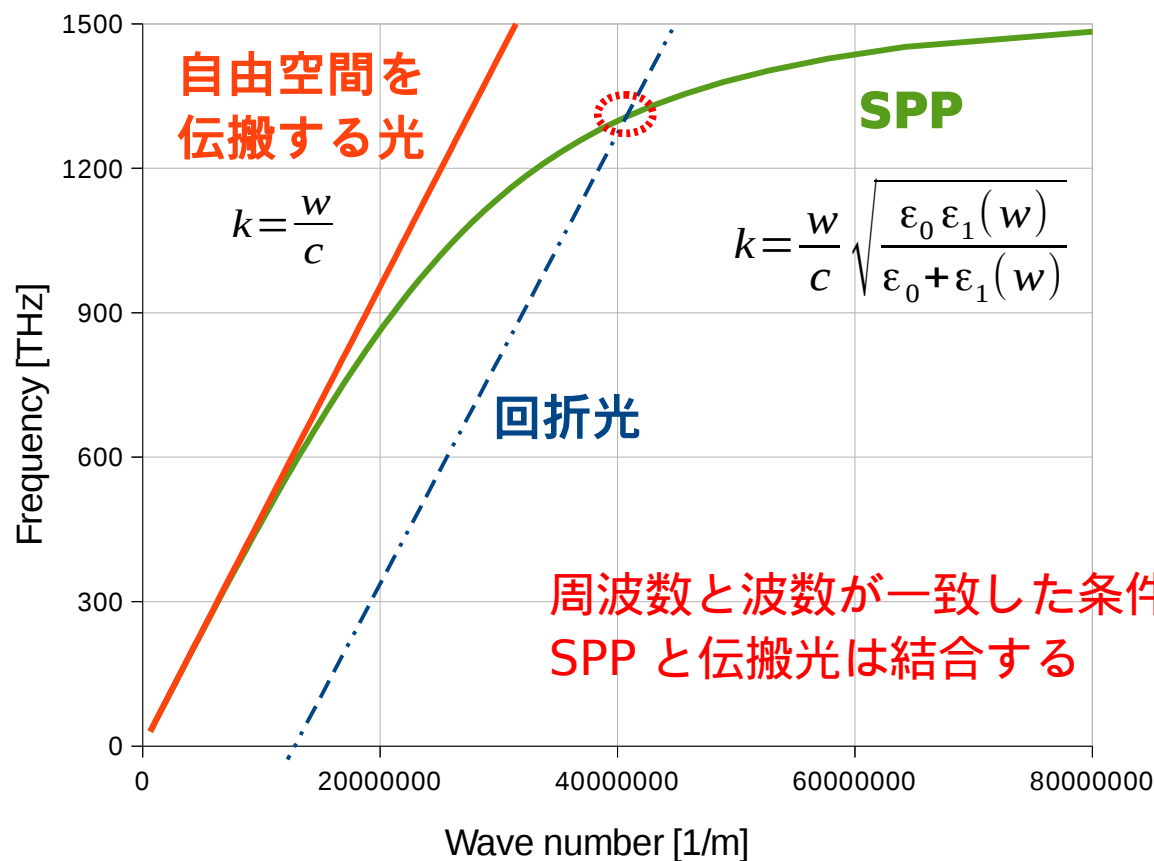
目的：中赤外域での SPP を励起し伝搬長を求める

構想 1: 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



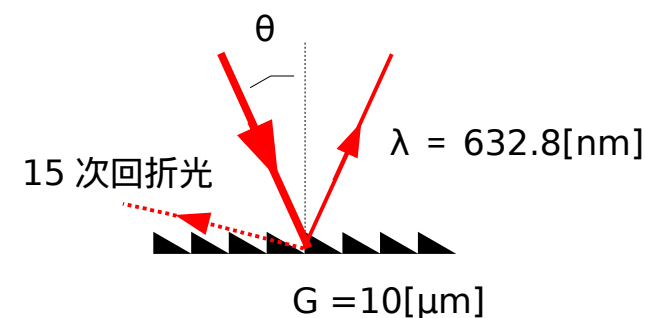
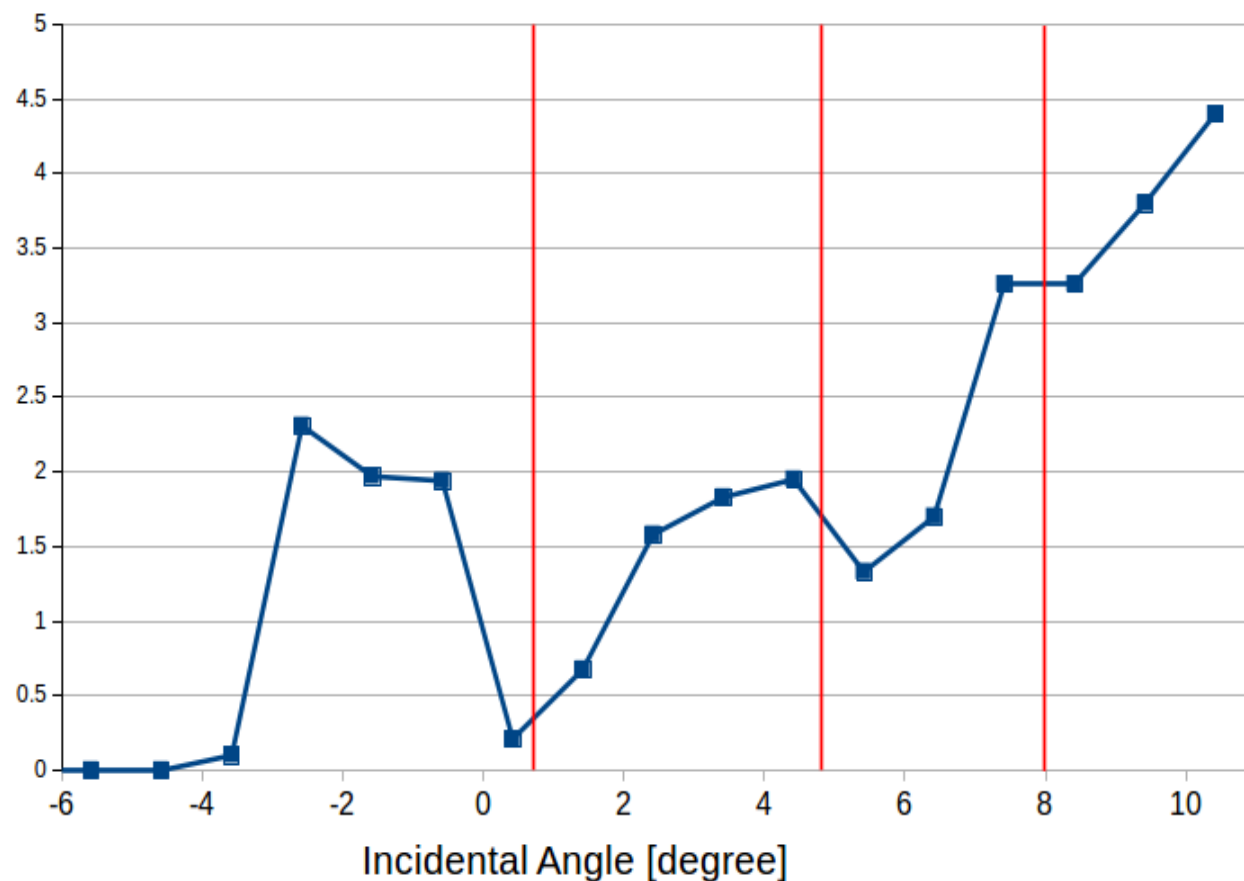
伝搬光と SPP は通常結合しないが、回折格子により結合できる



河田, プラズモニクスが拓く光デバイスの新展開, レーザー研究 (2008)

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

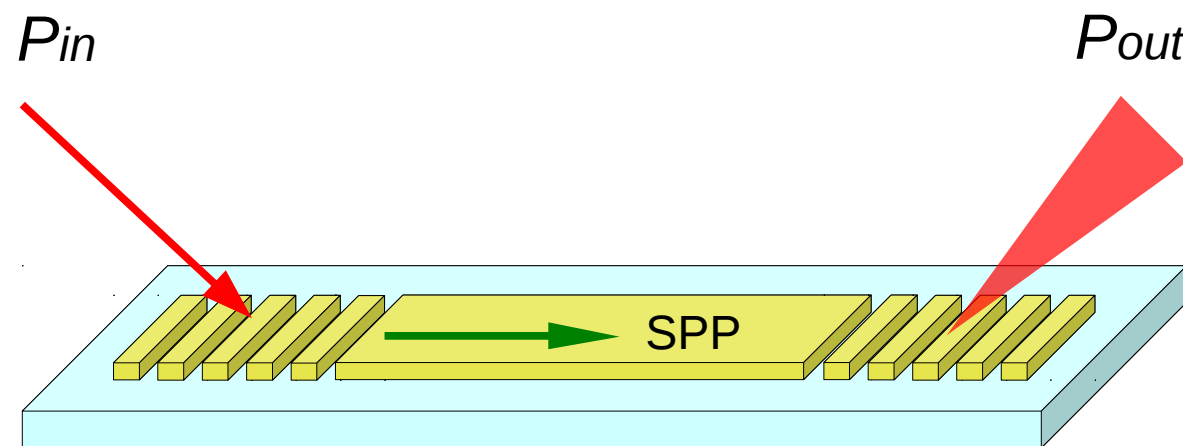


回折光強度に特異的な溝が発生している

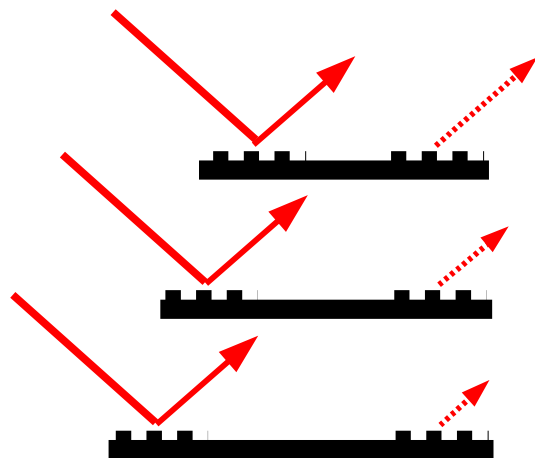
→ 回折光のエネルギーが SPP の励起に使われた

理論で予想される条件

構想 2: SPP 伝搬長の測定方法

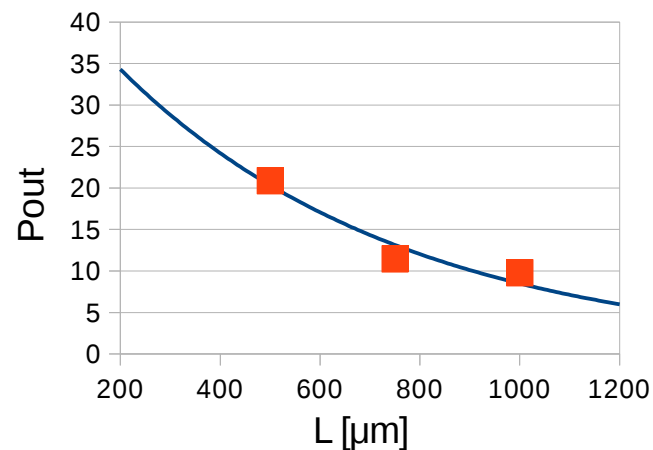
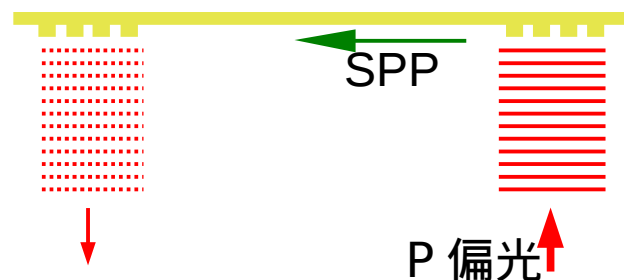
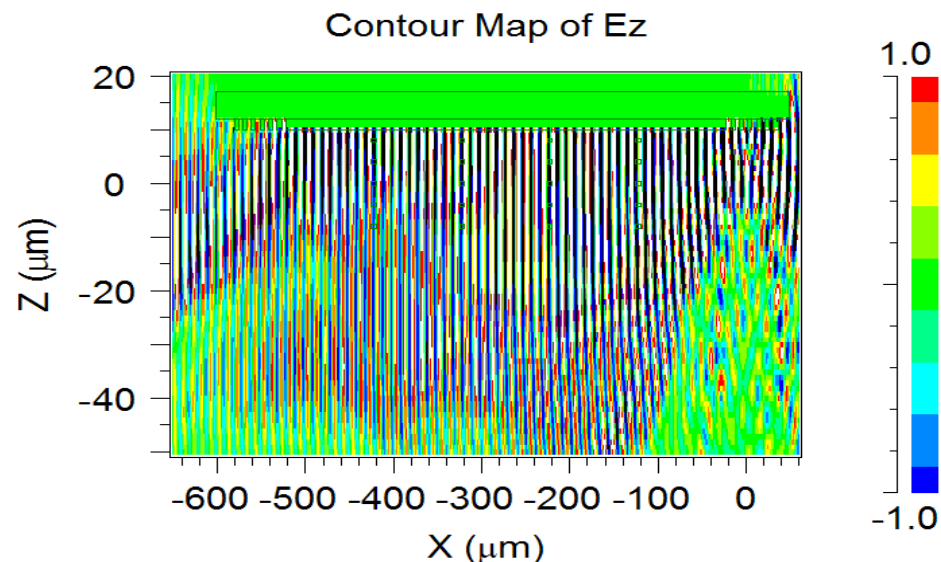
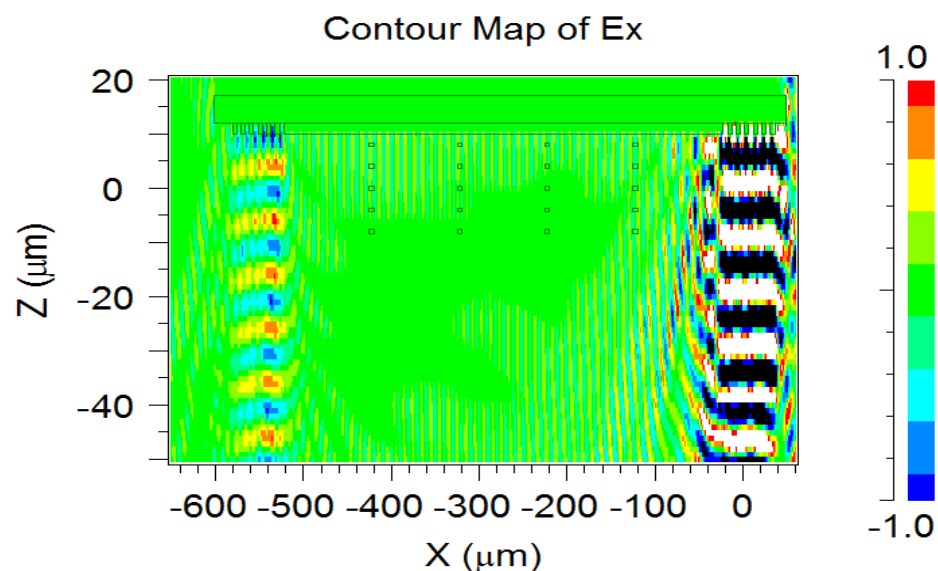


$$\eta \times \exp(-L/L_0) \times \eta$$



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)

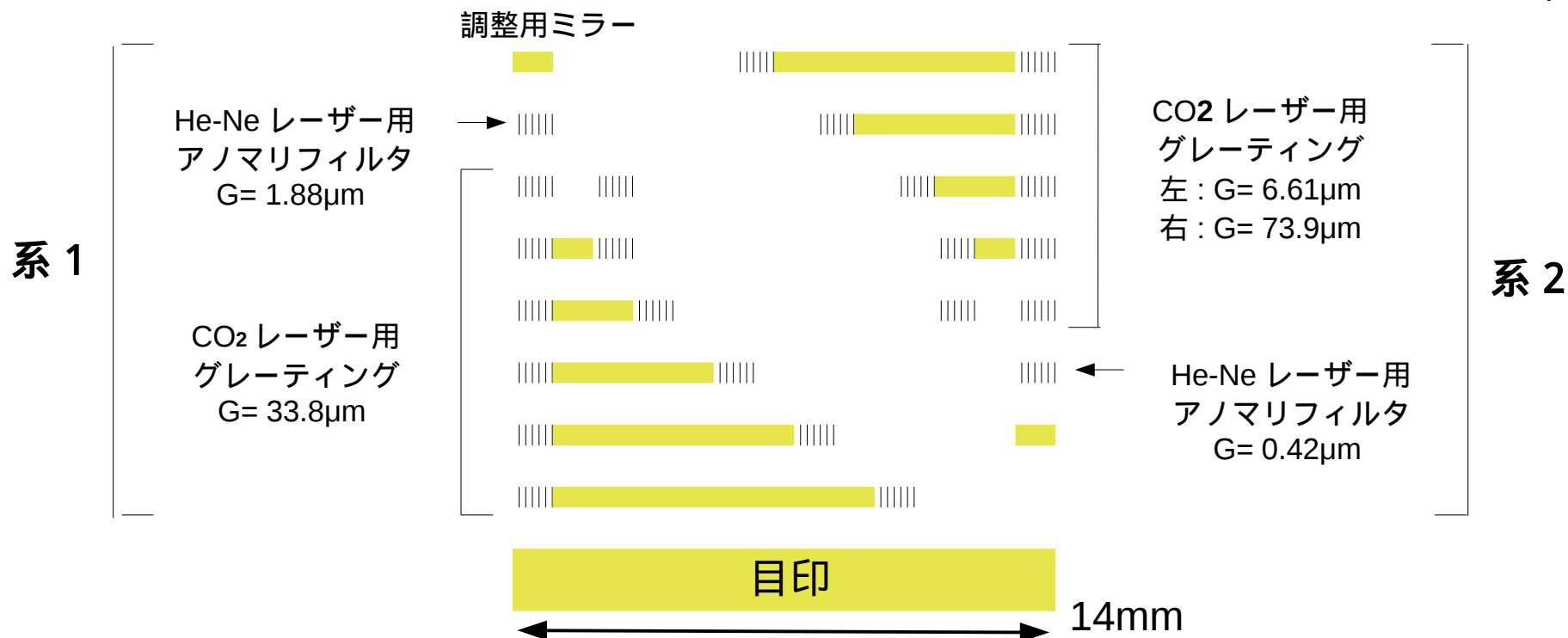
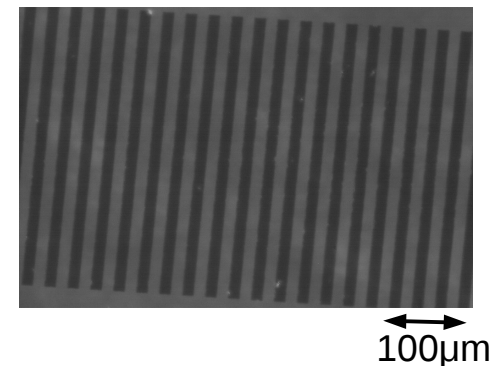


入射光に対する検出光の電場強度比は最大 20%

デバイスの作製

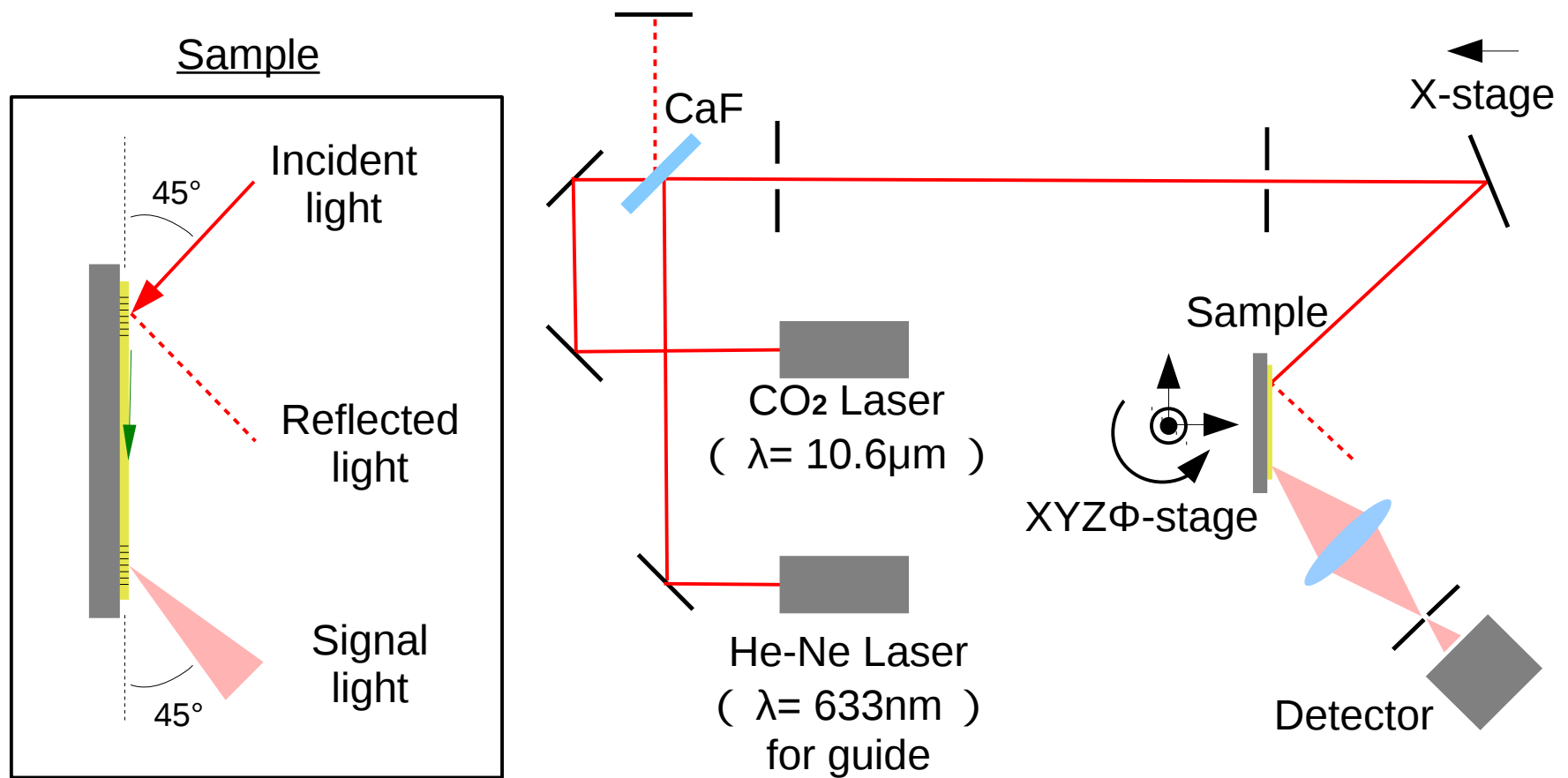
- 電子線描画装置を用いて ZnS 基盤上に導波路構造を作成した

$G = 33.8[\mu\text{m}]$ の回折格子
子についての顕微鏡写真

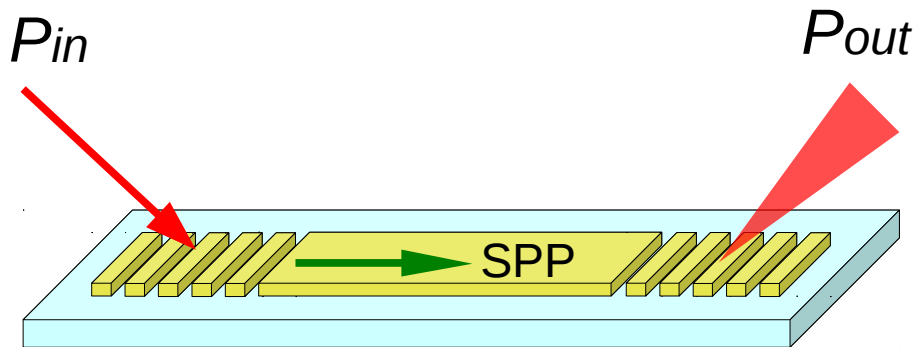


実験光学系の作成

- SPP の励起と検出を行うための光学系を作成した



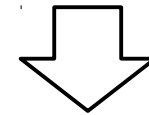
信号光 P_{out} の検出



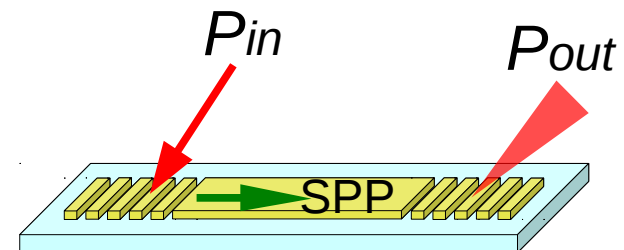
ノイズレベル 70mv 程度以上の
信号光 P_{out} は検出できなかった

考察

- SPP の励起に適切な角度と位置に、赤外光の入射が行えてい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

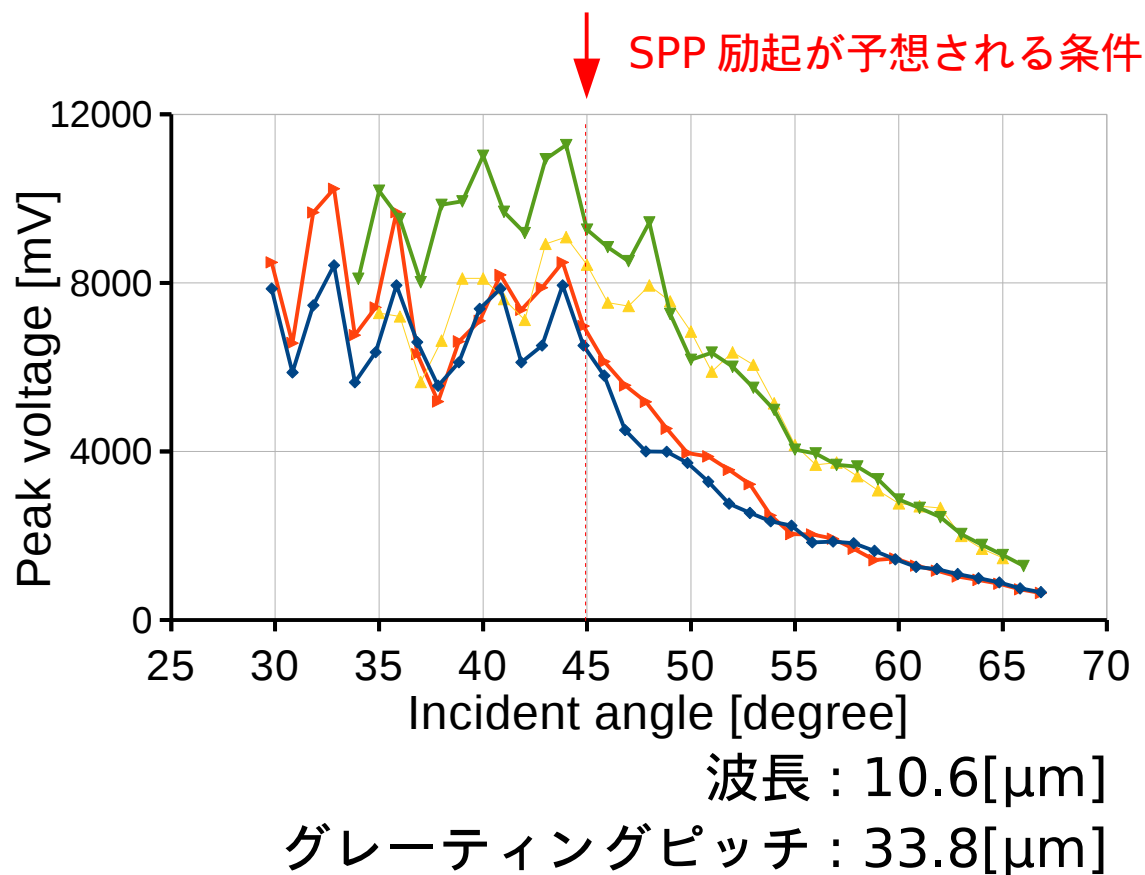


入射光の反射が無視できる配置で
再度、慎重に実験を行う



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

まとめ、今後の展望

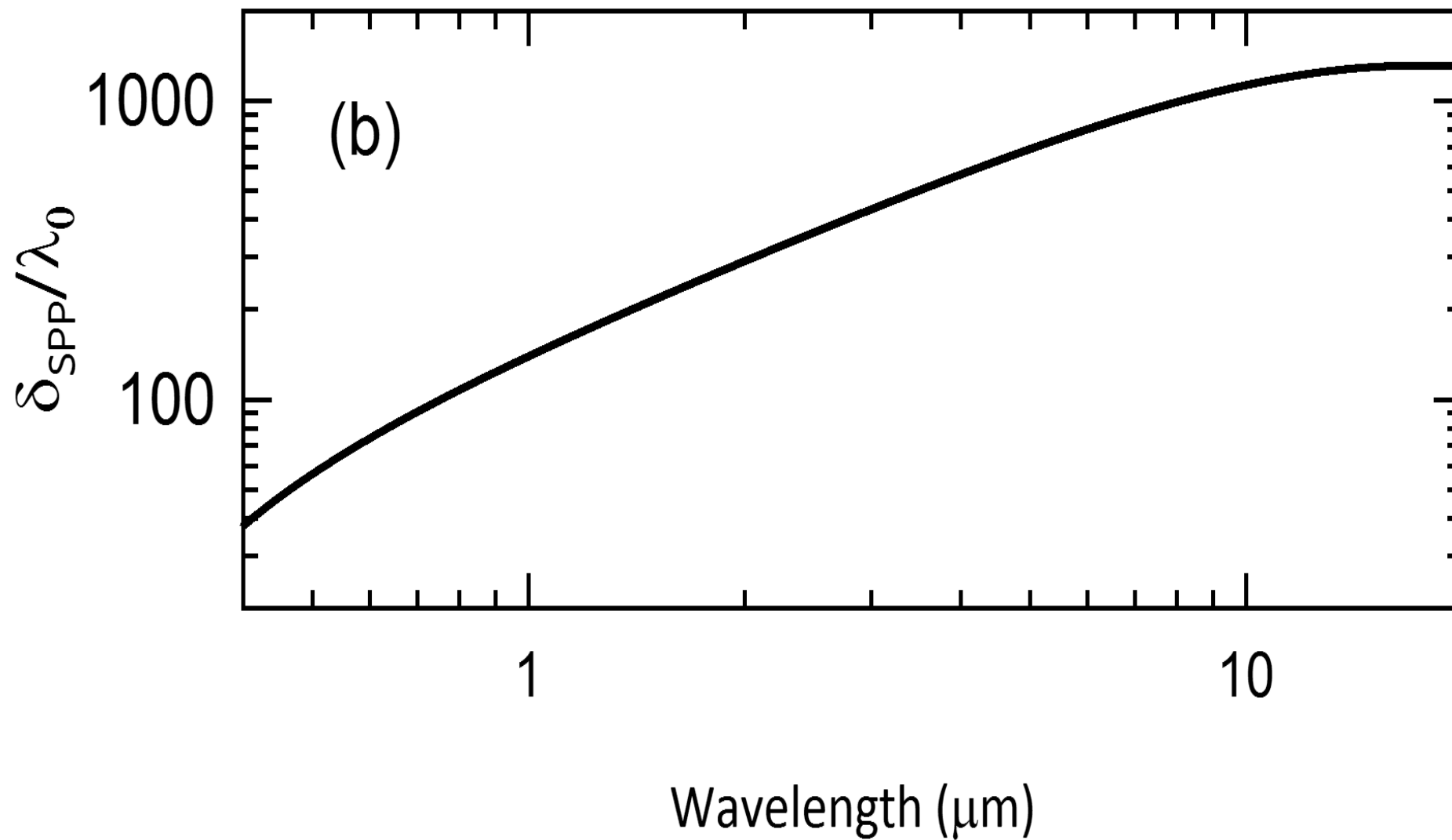
まとめ

- 中赤外域における SPP の伝搬長測定の方法を検討した
- 電磁界シミュレータを用いた解析で、SPP の励起を確認し励起効率を見積もった
- 実験デバイスおよび実験光学系を設計し、実際に作成した
- 可視域での SPP の励起を確認したが、中赤外域の伝搬長は計測できなかった

今後の展望

- 1 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
- 異なる光学配置を用いて SPP の伝搬長を測定する

補助資料

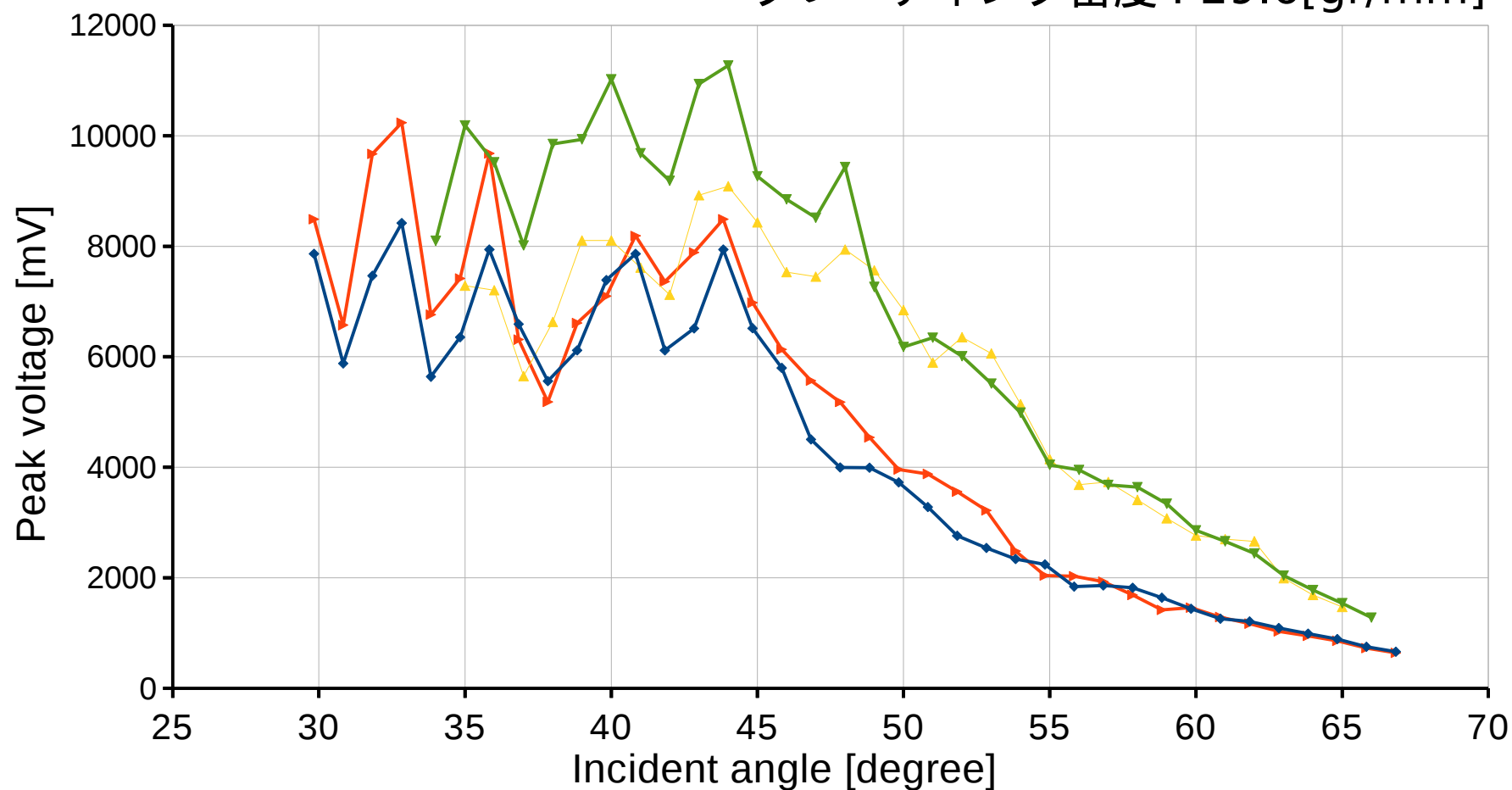


補助資料

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

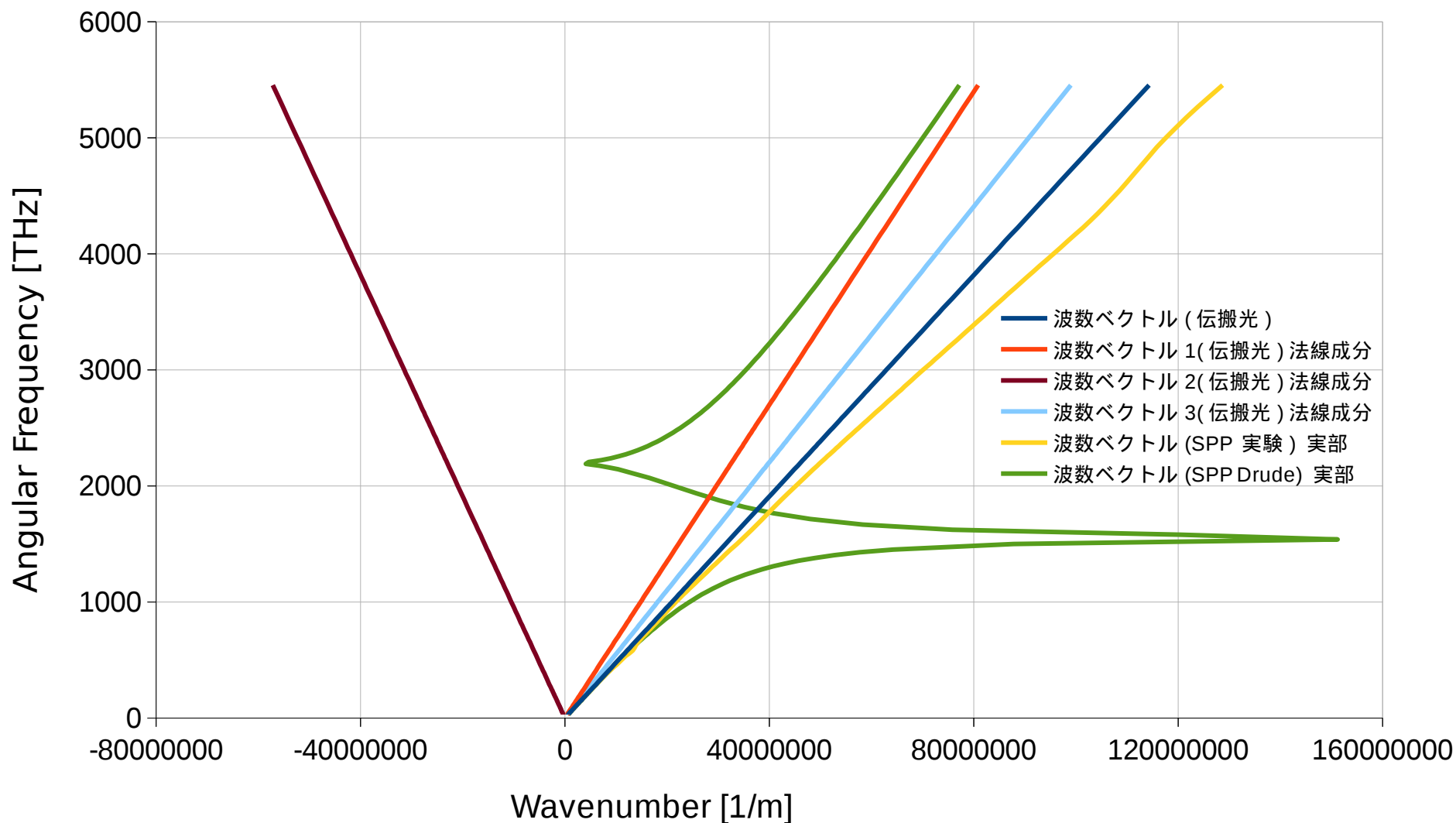
波長：10[μm]

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

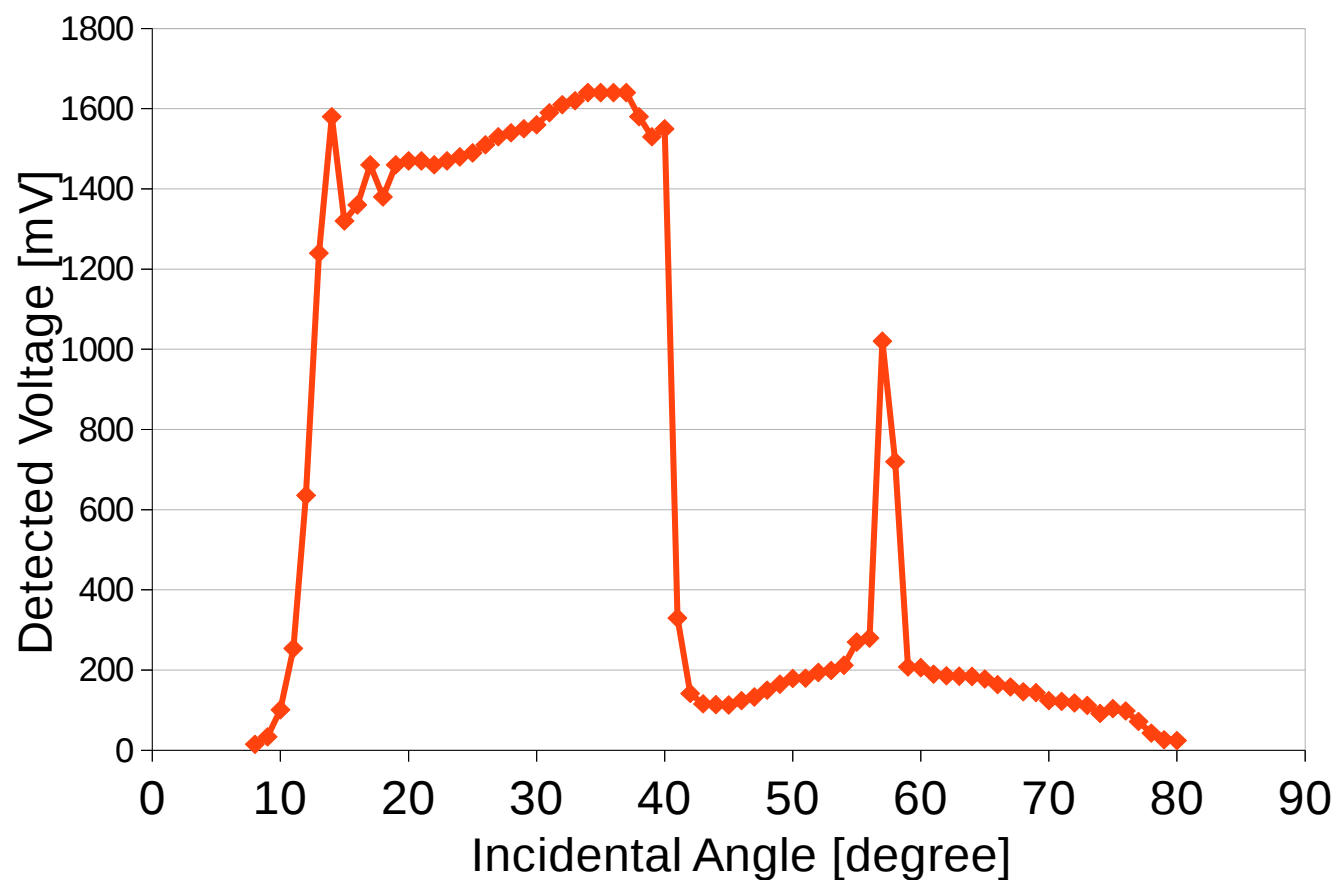


補助資料

赤外光の 0 次回折光（反射光）強度の角度依存性

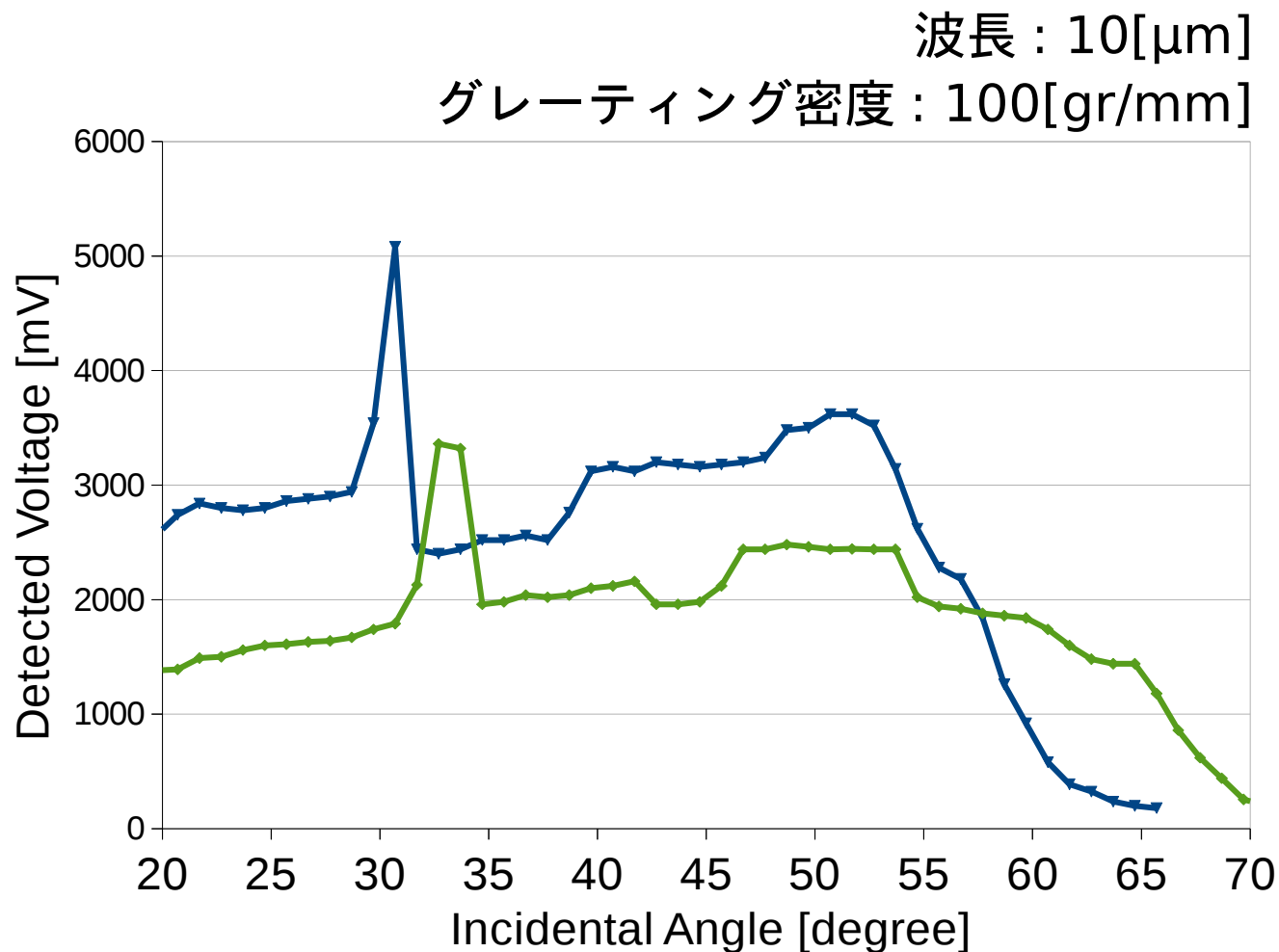
波長：10[μm]

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

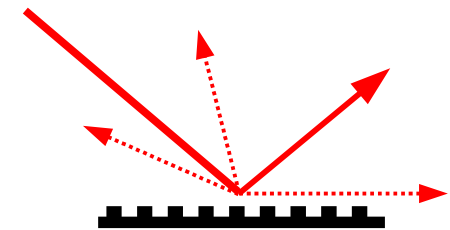
補助資料

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

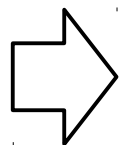
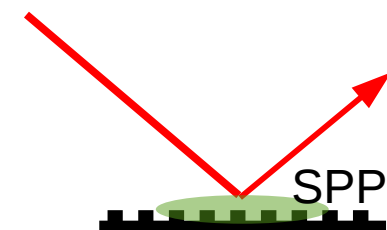
◎S 偏光で如実



- **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

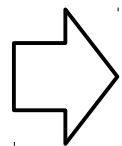
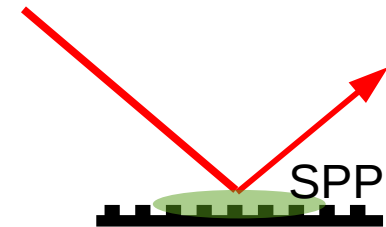


アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

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



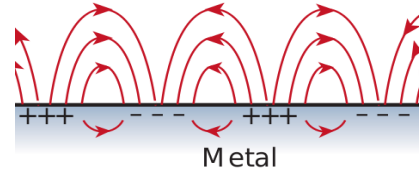
アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

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

芦原研究室 / 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

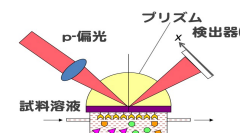
金属表面での電磁波と
自由電子の粗密波の連成波



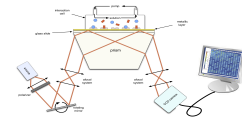
電場増強効果、空間閉じ込め効果、共鳴条件の敏感性



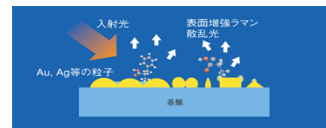
応用例：物質の高感度なセンシング（たんぱく質、超薄膜など）、
ナノイメージング、表面増強ラマン分光、光集積回路



梶川, 産総研 web 用配布資料 (2012)

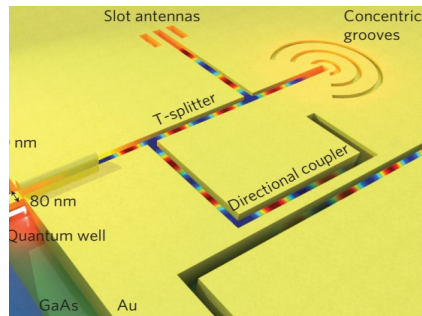


Canva Micheal, et al., Surface Plasmon resonance Imaging, photonics4life(2010)



浜松ホトニクス公式 HP 「ナノホトニクス：
基礎研究・応用研究」

本研究の目的



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、近赤外域で行われてきた
- 中赤外域 (波長 $3\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$) では 10mm オーダーで長く伝搬することが予想される



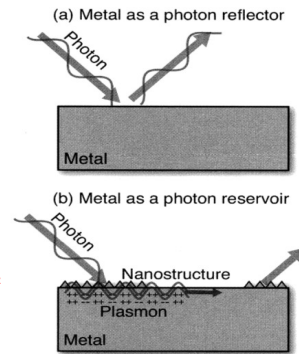
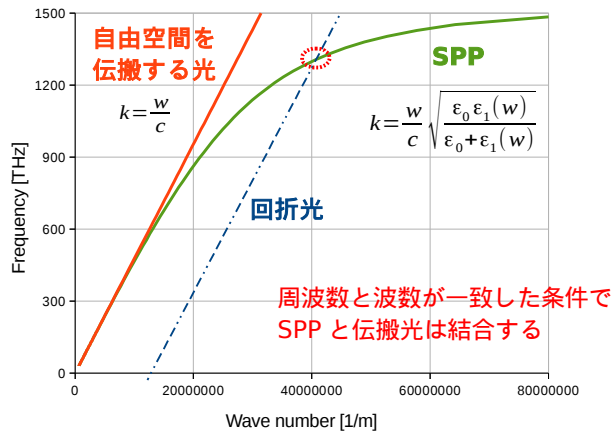
目的：中赤外域での SPP を励起し伝搬長を求める

構想 1: 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



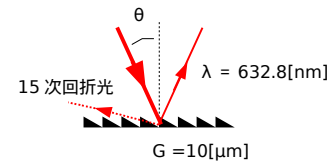
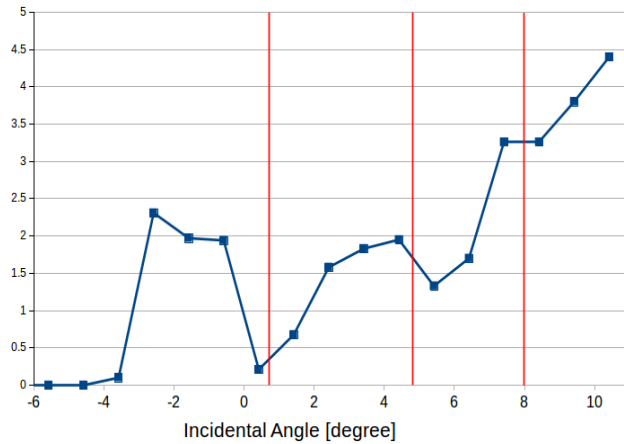
伝搬光と SPP は通常結合しないが、回折格子により結合できる



河田，プラズモニクスが拓く光デバイスの新展開，レーザー研究 (2008)

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

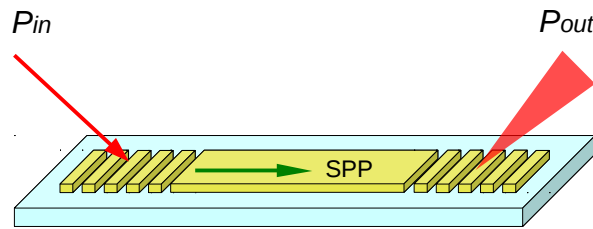


回折光強度に特異的な溝が発生している

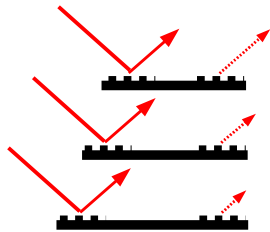
→ 回折光のエネルギーが SPP の励起に使われた

理論で予想される条件

構想 2: SPP 伝搬長の測定方法

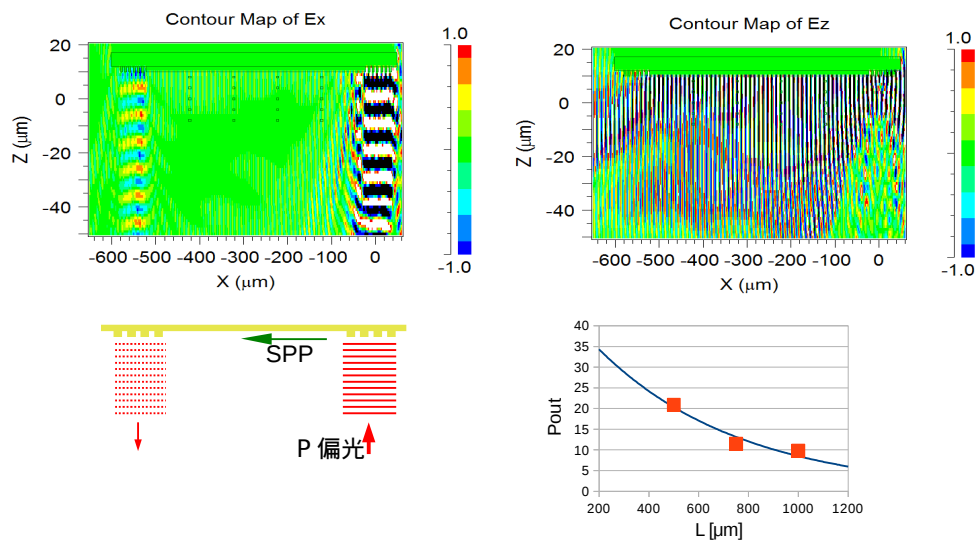


$$\eta \times \exp(-L/L_0) \times \eta$$



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)

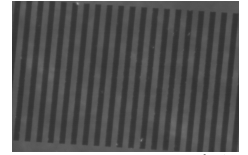


入射光に対する検出光の電場強度比は最大 20%

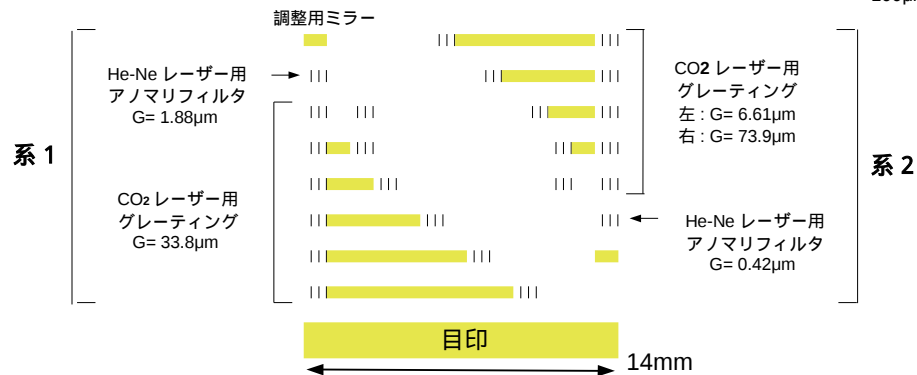
デバイスの作製

- 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

G = 33.8[μm] の回折格子についての顕微鏡写真

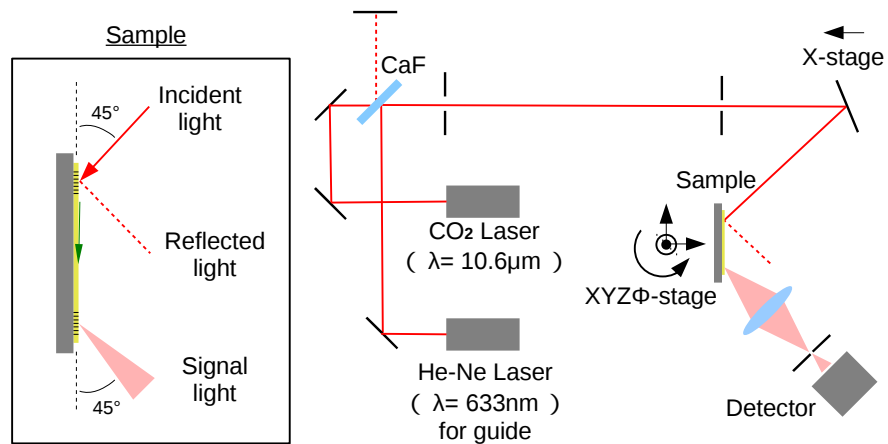


100 μm

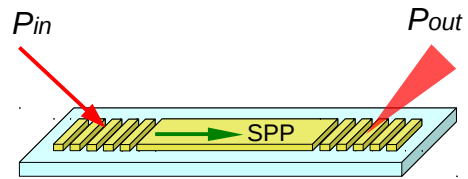


実験光学系の作成

- SPP の励起と検出を行うための光学系を作成した



信号光 P_{out} の検出



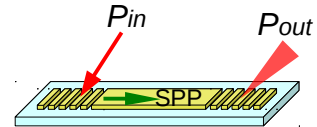
ノイズレベル 70mv 程度以上の
信号光 P_{out} は検出できなかった

考察

- SPP の励起に適切な角度と位置に、赤外光の入射が行えてい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

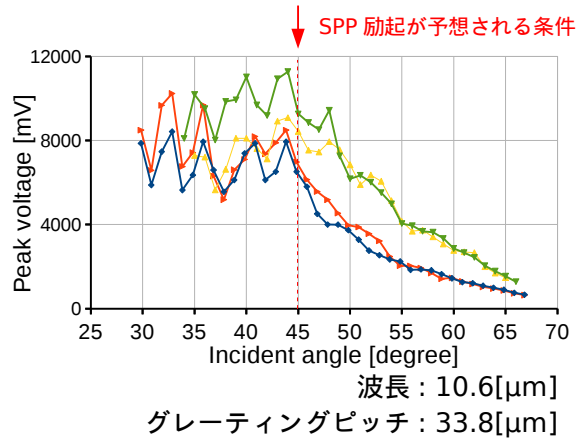


入射光の反射が無視できる配置で
再度、慎重に実験を行う



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

まとめ、今後の展望

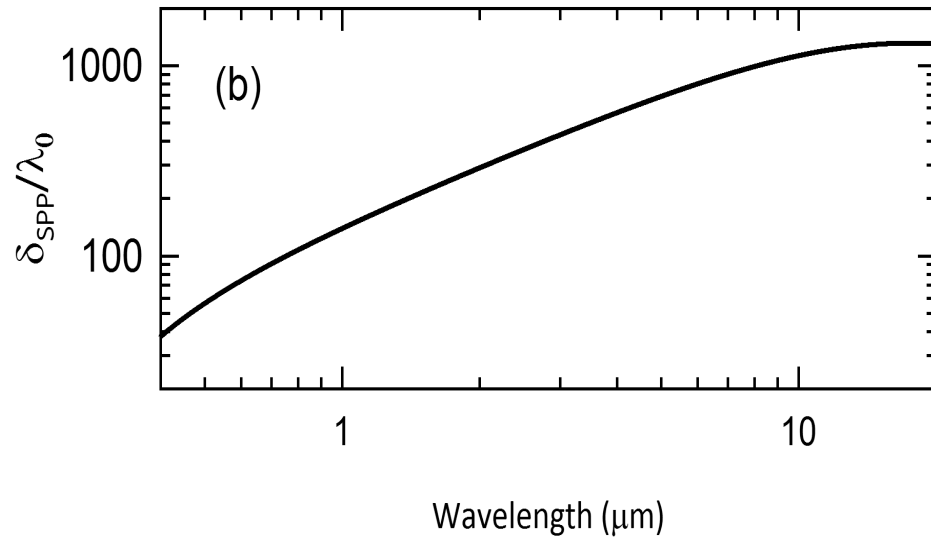
まとめ

- 中赤外域における SPP の伝搬長測定の方法を検討した
- 電磁界シミュレータを用いた解析で、SPP の励起を確認し励起効率を見積もった
- 実験デバイスおよび実験光学系を設計し、実際に作成した
- 可視域での SPP の励起を確認したが、中赤外域の伝搬長は計測できなかった

今後の展望

- 1 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
- 異なる光学配置を用いて SPP の伝搬長を測定する

補助資料

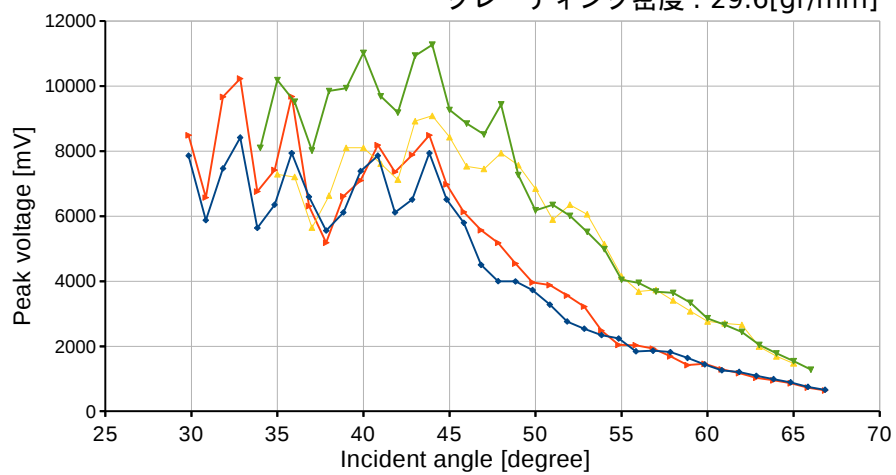


補助資料

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

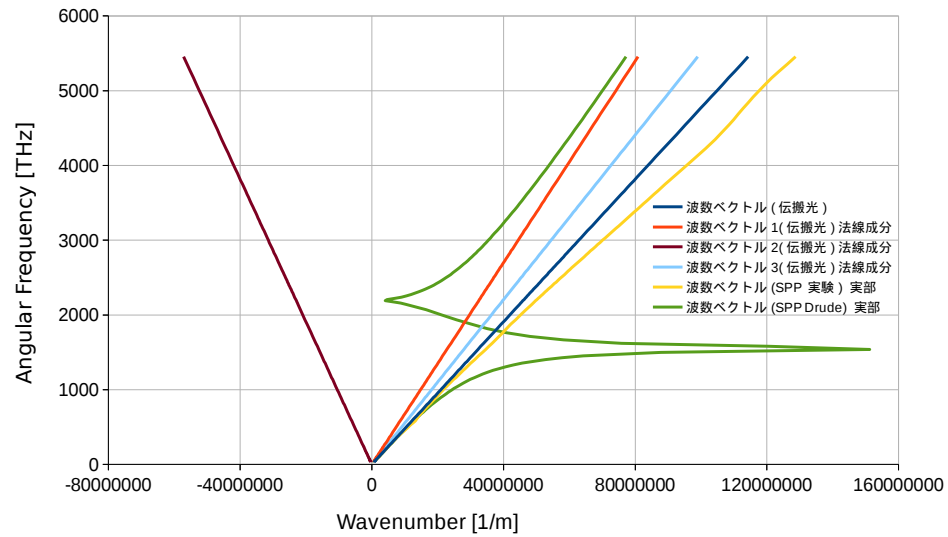
波長 : 10[μm]

グレーティング密度 : 29.6[gr/mm]



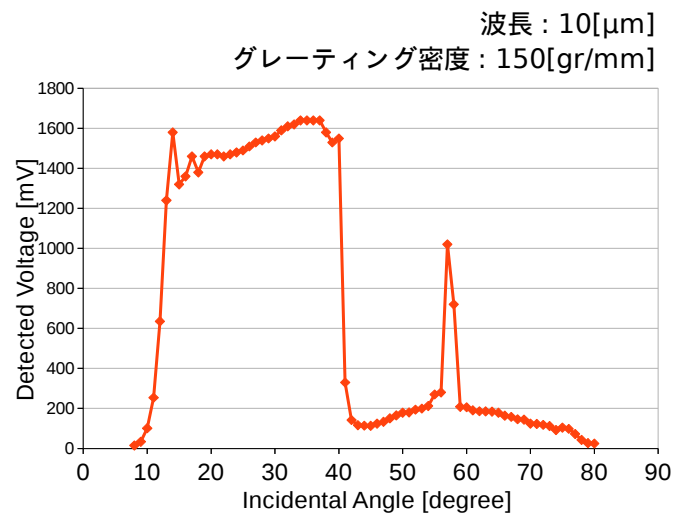
補助資料

金 - 空気間における SPP の分散関係



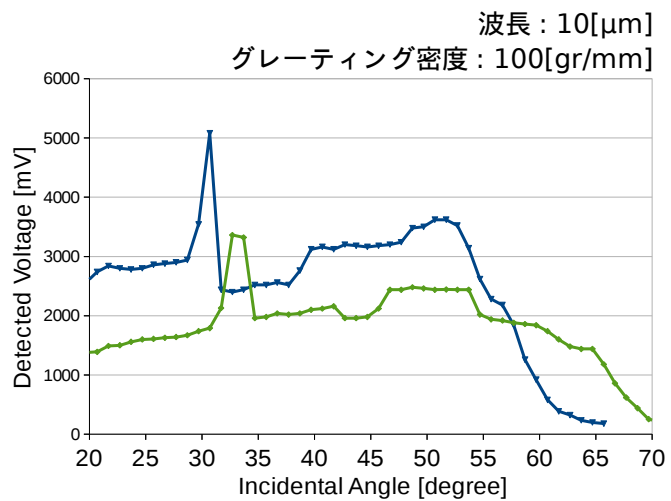
補助資料

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

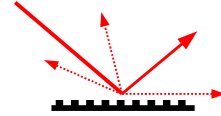
補助資料

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

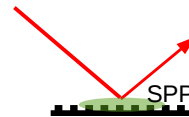
◎S 偏光で如実



- **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

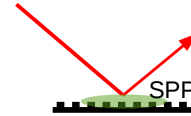


アノマリの分析によって SPP の励起を確認できる

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