

## 2 ビームの位相差による表面プラズモン制御 Surface plasmon control using a phase difference of two laser beams

吉田和洋\*, 嘉藤勝也\*, 目黒和幸\*\*, 大坊真洋\*

Kazuhiro YOSHIDA\*, Katsuya KATO\*,  
Kazuyuki MEGURO\*\*, Masahiro DAIBO\*

\*岩手大学, \*\*岩手県工業技術センター

\*Iwate University, \*\*Iwate Industrial Research Institute

キーワード：表面プラズモン (Surface plasmon), 干渉 (interference),  
光計測 (optical measurement)

連絡先: 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学 工学部 電気電子工学科 大坊研究室  
大坊真洋, Tel.:(019)621-6983, Fax.:(019)621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

### 1 はじめに

近年コンピュータの急速な普及により, 我々の生活は快適で便利なものになっている. この理由の一つとしてコンピュータの高速化が挙げられ, これは半導体の集積化の発展によるものである. しかしながら, 集積化によって生じる配線遅延および発熱の増加により, コンピュータの高速化は飽和に向かっている. この問題は電気信号の代わりに光信号を用いれば解決できるが, 光は回折現象により素子サイズが制限されるため集積化に限界がある. 高速化と集積化を同時に解決させる方法として今注目されてい

るのが, 表面プラズモン (SP) を用いた方法である [1].

表面プラズモン [2] とは導体と誘電体の境界面で発生する電子の粗密波である. 表面プラズモンは表面波であることから, 光を表面プラズモンに変換させることで, 光の信号を表面という局所的な空間に閉じ込めて伝搬させることが可能になる. そのため, 光の回折限界よりも小さな領域に光の閉じ込めることが可能となるので, 回路の高速化と集積化が同時に実現できる. このことから現在 SP の応用研究 [3],[4],[5] が活発に行われている.

当研究室では, 光による表面プラズモンの発生

および2つのレーザー光の位相差を利用して表面プラズモンの制御する実験を行っている．今回は表面プラズモンの励起実験および2つのレーザー光の位相差を用いた制御の実験結果について報告する．

## 2 SP の励起実験

### 2.1 原理

まず，表面プラズモンに付随する電磁波はTMモードの電磁波であることから，TMモードの光(p偏光の光)を入射させなければならない．加えて，光と表面プラズモンとの間で周波数と波数の一致することが必要となる[2]．

ここで，p偏光で周波数，光速  $c$  の光が真空中から入射角  $\theta$  で金属膜上に入射するときを考える．周波数は常に一定なので表面プラズモンの角周波数  $\omega_{SP}$  と光の周波数  $\omega$  は一致する．一方，表面プラズモンの波数  $k_{SP}$  は  $\epsilon_m(\omega)$  を金属の誘電率とすると，

$$k_{SP} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega)}{\epsilon_m(\omega) + 1}} \quad (1)$$

と表すことができ，この波数は光の波数の表面に平行な成分は

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sin \theta \quad (2)$$

に対応する[1]．これら2つの式を比較すると，入射角  $\theta$  によらず  $k_{SP} > k_x$  となるので，平坦な金属表面に光をただ入射させるだけでは表面プラズモンを励起させることはできない．

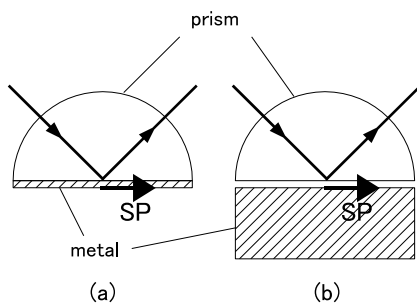


図1 代表的な表面プラズモンの励起方法  
(a)Kretschmann 配置, (b)Otto 配置

図1は代表的な表面プラズモンの励起方法である全反射減衰法(ATR法)の光学配置であり，それぞれ Kretschmann 配置，Otto 配置と呼ばれている．これらの方法はプリズム底面で光を全反射させ，その際に発生するエバネッセント光により表面プラズモンを励起を可能にする．

試料作成および試料の光学系への配置が簡単な点から，本実験では Kretschmann 配置を採用した．

### 2.2 試料の作成方法および実験方法

実験試料は真空蒸着装置を用いて，圧力  $4.0 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ，基板温度 150 という条件でカバーガラス(Matunami製， $n=1.525$ )に約50nmの銀薄膜を堆積することで作成した．

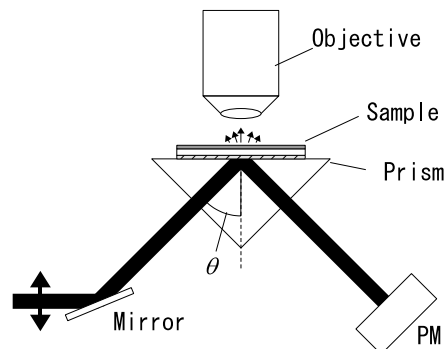


図2 SP 励起のための光学系

実験に用いた光学系の構成を図2に示す．まず，実験試料(Sample)はインデックスマッチングオイル( $n=1.52$ )を用いてプリズム(Prism,  $n=1.516$ )底面上に密着させてある．そこに，p偏光のHe-Neレーザー( $\lambda=632.8\text{nm}$ )の光をミラー(Mirror)により実験試料に入射角  $\theta$  で入射させて，反射光強度をパワーメータ(PM)により測定する．また同時に，銀薄膜から発生する散乱光を対物レンズ(Objective,  $\times 50$ ,  $N.A=0.8$ )によって集め，その先に接続された分光器により散乱光強度を測定した．

## 2.3 実験結果

図3に入射角 $\theta$ における反射光の測定結果を示す．入射角が約43.2度の時，光吸収が起きていることが確認でき，この角度において表面プラズモンが発生していると考えられる．また図4は入射角 $\theta$ における散乱光強度の測定結果であるが，光吸収が起きる角度において銀薄膜上からの散乱光が顕著に増加していることが確認できる．41度付近における散乱光強度と比較すると表面プラズモンが励起される時の散乱光強度は約60倍増強されている．文献[6]より，この散乱光の増強は励起された表面プラズモンが銀薄膜の表面粗さにより伝播光に変換されたものであると考えられる．

## 3 2つのレーザー光の位相差を用いた制御の実験

### 3.1 試料の作成方法

試料の作成手順を図5に示す．銀薄膜の加工には電子線リソグラフィを用いていた．まず，カバーガラスに電子線感光レジスト (EB resist, ZEP520A, ZEON) をスピンコートし，膜厚200nmのレジスト膜を形成する．そして，電子線描画装置 (ELS-3700, ELIONIX) により露光し，その後現像することでレジスト膜のパターンが形成される．その後，この上から真空蒸着装置より銀薄膜の形成し，有機溶剤等でレジスト膜を除去しリフトオフにより銀のパターンが完成する．作成した試料のSEM画像を図6に示す．試料は $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ の正形状の銀薄膜の中央に長さ $200\mu\text{m}$ のスリットが形成された構造になっており，スリットの幅は250～600nmの間で幅の異なるものをそれぞれ作成した．

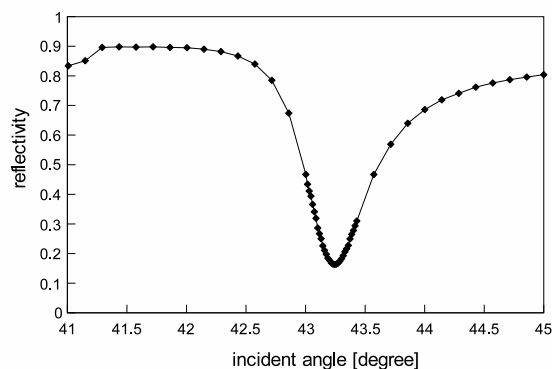


図3 入射角に対する反射率

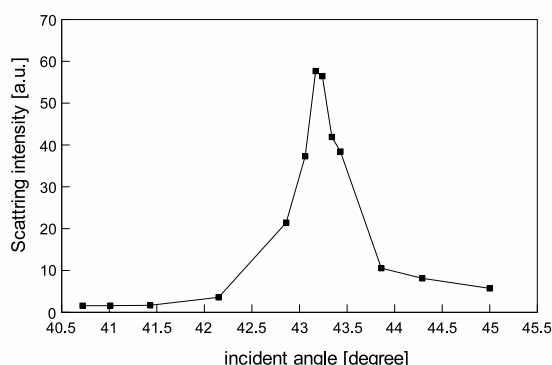


図4 銀薄膜からの散乱光強度

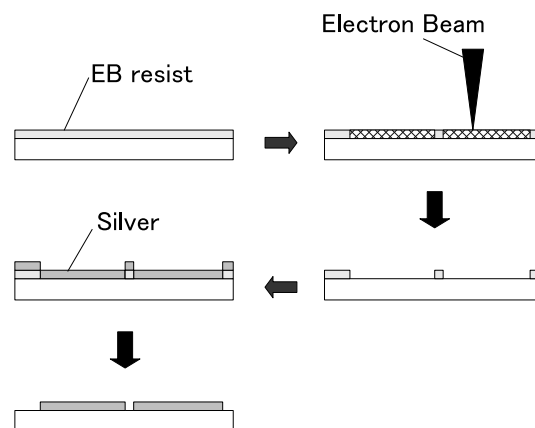


図5 試料の作成手順

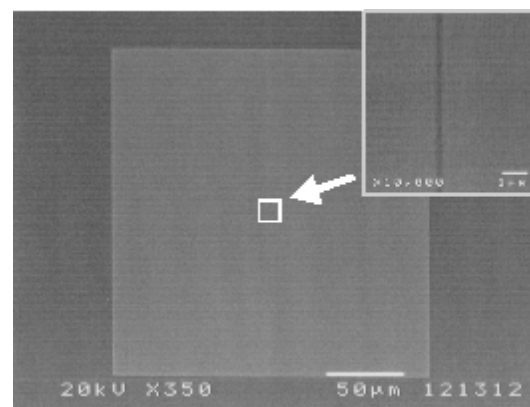


図6 作成した試料のSEM画像  
(スリットの幅は約250nm)

### 3.2 実験に用いた光学系について

実験に用いた光学系を図7に示す．この光学系はマッハ・ツェンダー干渉計を基に作成した．まず，He-Ne レーザーから発せられたレーザー光をスペイシャルフィルタ (SF) に通し，レンズ (Lens) によりコリメートすることで平面波を生成する．そして， $\lambda/2$  板 (HWP) と偏光ビームスプリッター (PBS) を通すことで，等パワーのレーザー光を2方向に取り出し，プリズム底面にて2つのレーザー光を重ね合うように調整されている．また，2つのレーザー光の位相差を変化させるために片方のミラーにはピエゾアクチュエータ (PZT) が取り付けられている．プリズム底面に実験試料を密着させて，その上から対物レンズ ( $\times 100$ , N.A=0.9) で試料付近の様子を観察した．また同時に実験試料を回転させた際に試料付近の様子に変化が現れるか比較を行った．尚，試料への光の入射角は45度とした．

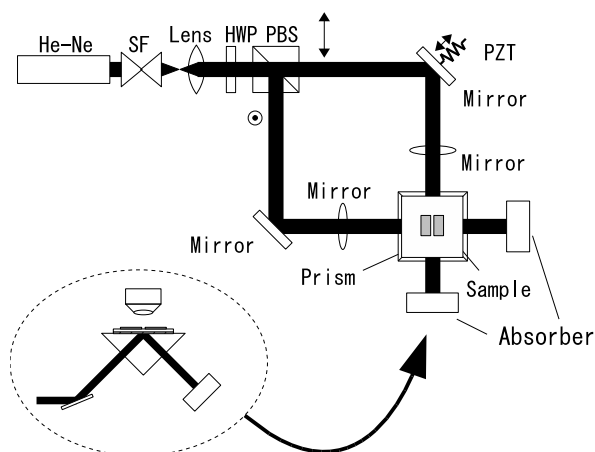


図7 光の位相差を用いた実験の光学系

### 3.3 実験結果

図8は，スリット幅が250nmの実験試料によって得られた顕微鏡画像である．スリットが垂直の時 (a) はスリット上に変化は現れないが，スリットを左に45度ほど傾けるとスリット上に縞状のパターンが観測された．図9は，レーザ

光を一方向から入射した場合と2つのビームを入射させたときの比較である．2方向からレーザー光を入射した時に縞状のパターンが生じることが確認された．加えて，PZTに電圧を印加し位相差を変えたところ縞状の光がシフトしたことからこの縞は2つのレーザー光によって生じた干渉縞であると言える．

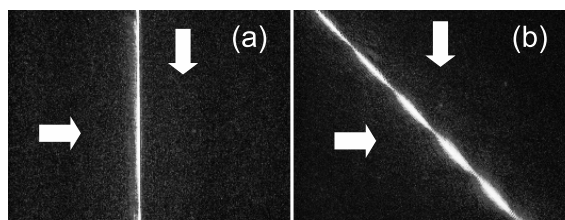


図8 試料を回転させた時の顕微鏡画像 (スリット幅は250nm, 矢印はレーザーの入射方向)

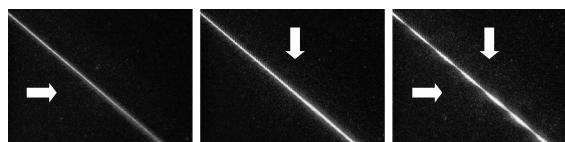


図9 レーザーの入射方向による画像の比較 (矢印はレーザーの入射方向)

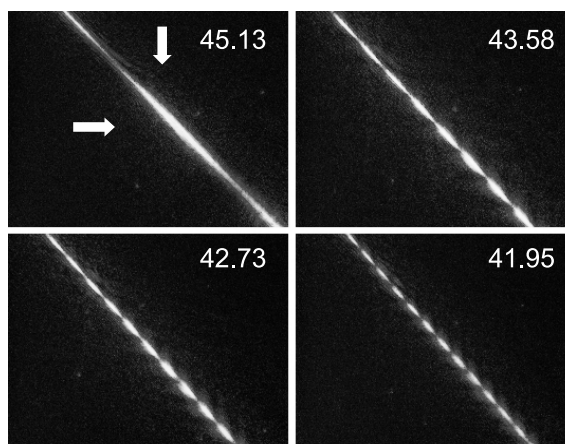


図10 スリットの角度による干渉縞の変化 (矢印はレーザーの入射方向，右上の数値はスリットの角度)

次に，スリットをわずかに回転させた時の干渉縞の様子を図10に示す．角度を45度から減少させると干渉縞の周期も減少していくことがわかる．スリットの角度と干渉縞の周期の関係は図11のように表され，45度付近で周期の変化は大きく，離れるにつれて変化が小さくなっていく．45度付近における干渉縞の周期が $60\mu\text{m}$

と大きいことから，光の干渉以外の相互作用によるものであると考えられる．

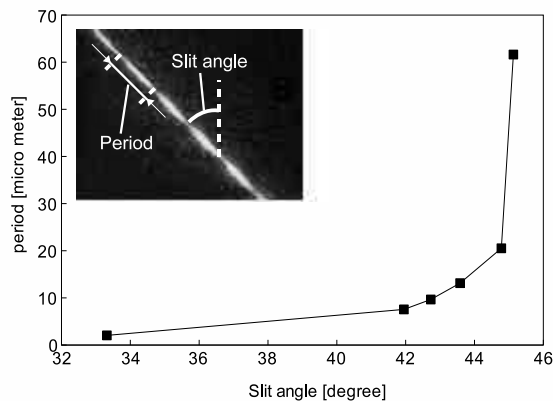


図 11 スリットの角度と干渉縞の週区の関係

最後に，スリットを右に回転させて画像観察を行った．その時の画像を図 12 に示す．この図から，干渉縞が現れていないことが分かる．このことから，この干渉縞は方向依存性を持ち，この系特有の現象であると言える．

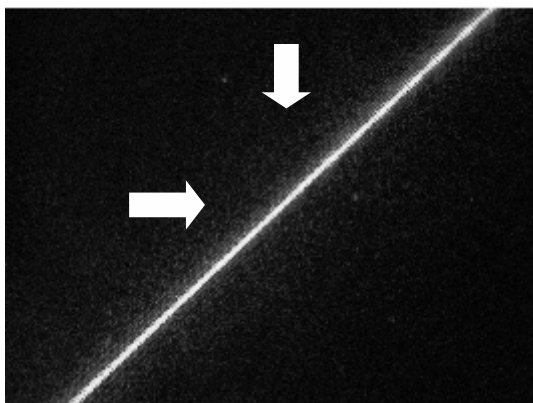


図 12 スリットを右に回転させた時の試料の様子 (矢印はレーザーの入射方向)

## 4 まとめ

表面プラズモンの励起実験および 2 つのレーザー光の位相差を用いた制御の実験を行った．表面プラズモンの励起実験では入射角が 43.2 度の時に SP 励起が起因となる光吸収が観測され，その時の銀薄膜からの散乱光強度は SP が励起されていないときの 60 倍であった．また，2 つのレーザー光の位相差を用いた実験ではスリットの回

転方向に依存性をもつ干渉縞がスリット上で観測された．

この現象は，位相差を用いることでスリット上の光強度を変えることが可能であるから，光ピンセットや分子マニピュレーションに応用できると考えられる．

今後は，スリットを左に 45 度回転させた時のみ干渉縞が発生するメカニズムを解明していく予定である．

## 参考文献

- [1] Rashid Zia, Jon A. Schuller, Anu Chandran and Mark L. Brongersma: Plasmonics: the next chip-scale technology, Materials Today 9, 7-8, 20/27(2006)
- [2] 大津 元一, 河田 聡, 堀 裕和: ナノ光工学ハンドブック, 86/93, 朝倉書店 (2002)
- [3] William L. Barnes, Alain Dereux and Thomas W. Ebbesen: Surface plasmon sub-wavelength optics, Nature, 424, 824/830 (2003)
- [4] Sergey I. Bozhevolnyia, Thomas Nikola-jensenb and Kristjan Leosson: Integrated power monitor for long-range surface plasmon polaritons, Optics Communications 255 51/56 (2005)
- [5] H. Ditlbacher, F. R. Aussenegg, J. R. Krenn, B. Lamprecht, G. Jakopic, and G. Leising: Organic diodes as monolithically integrated surface plasmon polariton detectors, Applied Physics Letters 89,161101 (2006)
- [6] Heinz Raether: Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings, 40/41, Springer-Verlag (1988)