

[研究助成 (A)]

プラズモニックメタ表面による偏光制御素子の作製と 眼底検査用偏光 OCT への応用

Fabrication of polarization controlling devices by using plasmonic metasurface and application to application to polarization sensitive optical coherence tomography for fundus examination

2221031



研究代表者

三重大学 大学院工学研究科

准教授

元垣内 敦 司

[研究の目的]

眼底検査で眼の内部の病気を調べるためには偏光 OCT (Optical Coherence Tomography, 光干渉断層計) が用いられている。偏光 OCT では直線偏光の光を用いることが多いが、網膜内の複屈折や偏光解消効果を考慮してより鮮明な画像を得るためには、任意の楕円偏光を得ることができる光学素子を実現することが必要である。これが実現できれば、機械によって超高齢化社会に伴う眼疾患の予防ができるので、人間と機械の調和の促進が期待できると考えられる。

本研究では金属ナノ構造からなるプラズモニックメタ表面を利用して任意の偏光状態を制御できる光学素子を実現し、眼底検査用偏光 OCT の高性能化を目指す。この目的を実現するために、プラズモニックメタ表面の構造によってどのように偏光状態が変化するかをシミュレーションと実験によって明らかにする。

[研究の内容, 成果]

本研究では最初に金属 1 次元回折格子を用いた偏光制御素子の作製と位相差測定の結果について述べる。この結果について、RCWA (Rigorous Coupling Wave of Analysis, 厳密波結合解析) 法によるシミュレーションを行い、表

面プラズモン共鳴が偏光状態に及ぼすメカニズムについて考察を行い、最後に「構造パラメータによる」偏光状態の制御について述べる。

(1) Ag 1 次元回折格子を用いた偏光制御素子の作製と位相差制御

図 1 に示すような Ag1 次元金属回折格子を石英ガラス基板上に作製した。周期は 360 nm, Ag の細線幅は 252 nm, Ag の厚みは 30 nm である。素子は電子線描画装置を用いてレジストパターンを作製した後、Ag 薄膜をスパッタリング法で堆積させ、リフトオフにてレジスト層を除去して作製した。図 2 に作製した素子の表面 SEM 像を示す。ほぼ設計通りの素子を作製することができた。作製した素子に 532 nm の光を照射して、セナルモン法により位相差測定を行った。図 3 にセナルモン法による位相差測定結果を示す。この結果から、作製した素子の TM 偏光と TE 偏光の光の位相差は 21.0° であることがわかった。

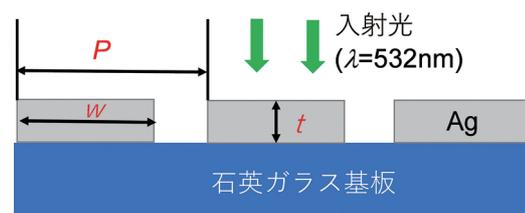


図 1 作製した Ag1 次元回折格子の模式図

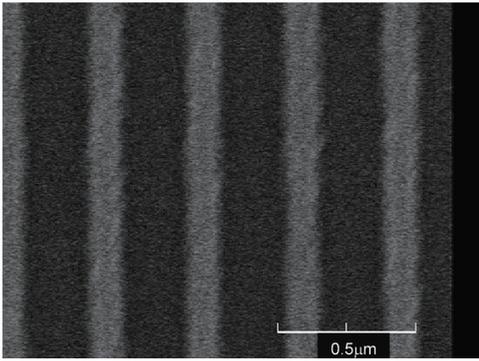


図2 作製した Ag1 次元回折格子の表面 SEM 像

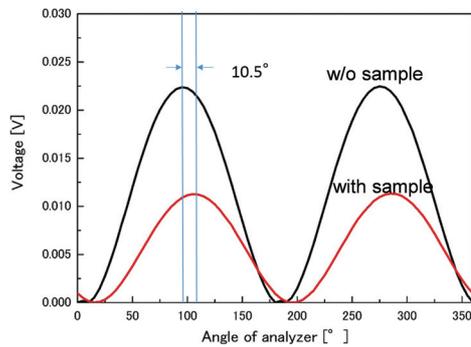


図3 セナルモン法による測定結果

(2) RCWA 法によるシミュレーション

次に RCWA 法によるシミュレーションを用いて偏光解析用のプログラムを作成し、実験結果との比較を行った。最初に実験結果の位相差の妥当性を調べるために、TE 偏光と TM 偏光の光を入射したときの入射光と透過光の位相差を計算したところ、TM 偏光は 2.2° の位相遅れ、TE 偏光は 21.4° の位相進みとなり、TE 偏光と TM 偏光の位相差は 24.0° となり、実験結果とほぼ一致することがわかり、作成した偏光解析用のプログラムの妥当であることがわかった。次に、構造パラメータによる透過率と位相差の変化を調べた。図4に Ag 回折格子の周期と透過率、位相差の関係を示す。TE 偏光は周期に対して透過率も位相もほぼ一定であるのに対して、TM 偏光では周期依存性があり、特に 364 nm と 532 nm で透過率がピークを持つことと、位相差が急激に変化していることがわかった。TM 偏光の光を金属回折格子に入射したとき、特定の周期で透過率がピークを持つことは、表

面プラズモン共鳴による異常透過現象が発生することによるものである。このため、位相差の急激な変化も表面のプラズモン共鳴によるものと考えられる。

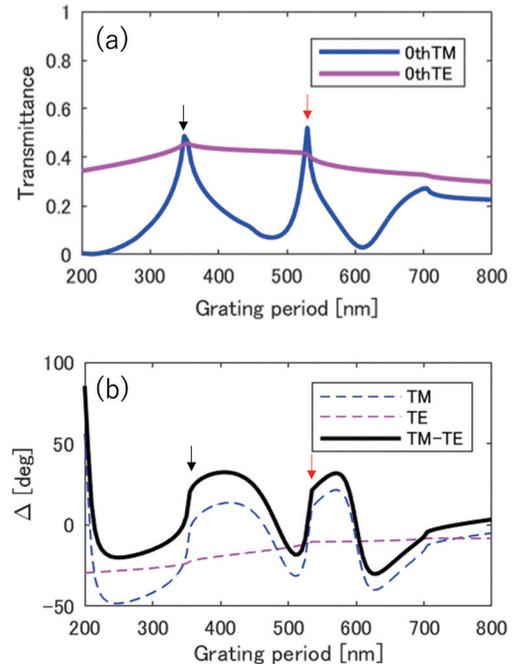


図4 Ag 回折格子の周期と透過率、位相差の関係

(3) 表面プラズモン共鳴が偏光状態に及ぼすメカニズムについて考察と構造パラメータによる偏光状態の制御

表面プラズモン共鳴によって TM 偏光の透過率と位相差に特徴的な変化があることがわかったので、その詳細なメカニズムを明らかにするために、図5に示すような Au の 1 次元回折格子構造でシミュレーションを行った。金属を Ag から Au に変更した理由は、Ag は表面プラズモン共鳴を発生させるためには有効な材料であるが、腐食しやすい材料であるため、偏光 OCT 用偏光素子としての利用が難しいため

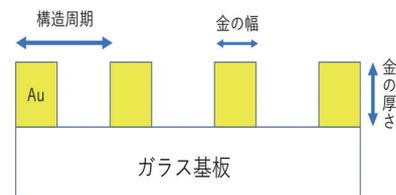


図5 Au1 次元回折格子の模式図

である。石英ガラス基板に Au の回折格子構造において、波長 635 nm の垂直入射の条件で、Duty 比 (Au の細線幅/構造周期) 0.7, 膜厚 80 nm に固定し、構造周期を変化させて、TM 偏光と TE 偏光の透過率, TM 偏光と TE 偏光の位相, TM 偏光と TE 偏光の位相差を調べた。

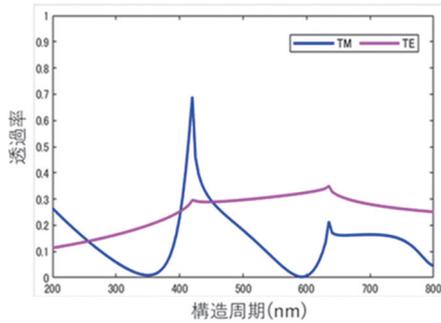


図6 構造周期と透過率の関係

図6は上記の条件での構造周期と透過率の関係を示す。Agの場合と同様にTE偏光は周期に関係なくほぼ一定の透過率である。一方、TM偏光は表面プラズモン共鳴が発生する構造周期で透過率が増加する。表面プラズモンが起こる構造周期より短周期側では透過率が急激に減少し、透過率のディップが見られる。図7は同じ条件での構造周期と位相差の関係を示す。TE偏光の位相は構造周期に関係なく一定であるのに対して、TM偏光の位相は表面プラズモン共鳴が発生する構造周期より短周期側では位相のディップが見られ、TM偏光の位相遅れが小さくなるため、位相差が小さくなる。一方、長周期側ではTM偏光の大きな位相遅延が見

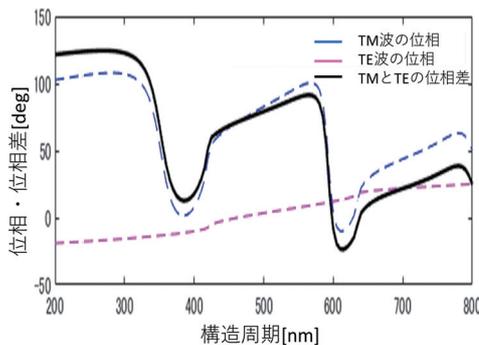


図7 構造周期と位相差の関係

られ、位相差が大きくなる。

次に、構造周期によってTM偏光の透過率と位相差に先述のような特徴が見られる理由について、RCWA法によるTM偏光透過率の透過率マッピングと電磁場分布の計算結果から考察した。図8に波長635 nm, 入射角度 0° , 金属材料Au, Duty比0.7, 膜厚80 nmの条件でのTM偏光の光の透過率マッピングを図に示す。カラーバーはTM透過率を示す。過去の研究で伝搬型表面プラズモン共鳴が発生すると、特定の入射角度でTM偏光の光に対して透過率が高くなることが明らかにしている。この系においても同様な結果が得られている。垂直入射の場合、構造周期435 nmと635 nmで透過率がピークになっており、図6, 7の結果と一致する。ここで2本の透過率のピークを示す軌跡に注目した。この軌跡と表面格子共鳴の分散関係から得られる入射角度と構造周期の関係を重ねたものが赤及び黄色い点線である。赤い点線は金とガラス界面での表面プラズモン共鳴に起因する表面格子共鳴で、黄色い点線は金と空気の界面での表面プラズモン共鳴に起因する表面格子共鳴であることがわかった。

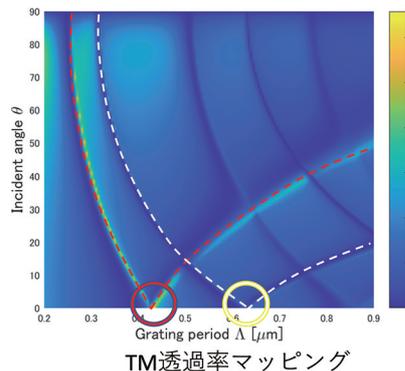
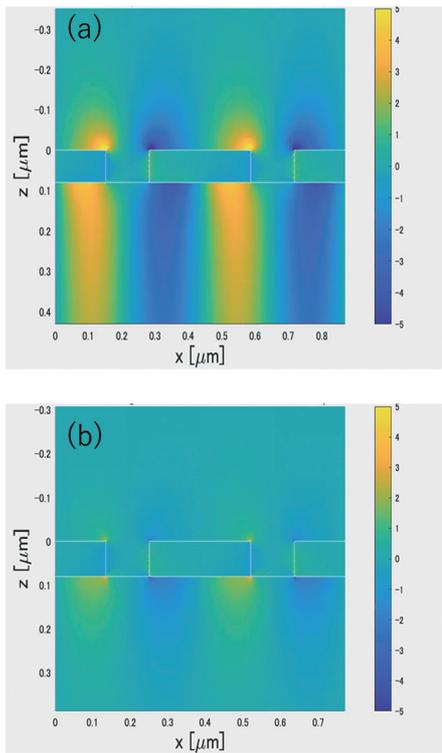


図8 TM偏光の光の透過率マッピング

次にz方向の電場分布から表面格子共鳴による伝搬型表面プラズモン共鳴と光の透過の関係調べた。図9に透過率のピークとなる構造周期435 nm (図9(a))と透過率のディップとなる構造周期386 nm (図9(b))の電場分布を示す。構造周期435 nmでの電場分布では、金属

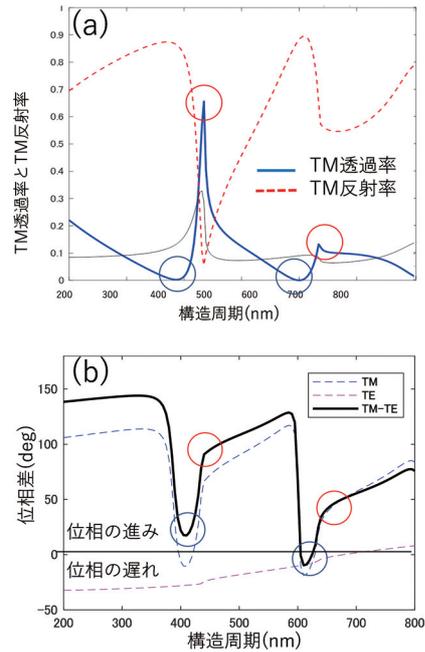


(a) 構造周期 485 nm, (b) 構造周期 386 nm

図9 z方向の電場分布

回折格子の4つの角で強い電場が見られたとともに、金属格子からz方向側に電場が見られた。これは、表面格子共鳴によって金属端間で強い局在型表面プラズモン共鳴が発生し、それによって金属下部で強い伝搬型表面プラズモン共鳴が誘起することを表しており、この二つの表面プラズモンが共鳴しあうことでファノ共鳴が発生すると考えられる。一方、386 nmの電場分布では、表面プラズモン共鳴が起きていないため、4つの角や金属格子からz方向側に電場がほとんど見られない。これは、表面プラズモン共鳴が阻害されているためこのような電場になったと考えられ、ファノ共鳴の反対でファノ反共鳴が発生すると考察される。

以上の考察を踏まえたうえで、構造周期と透過率、反射率、位相差の関係について考察する。図10に透過率、反射率、位相差と構造周期の関係を示す。透過率がピークの点では、反射率がディップをとり、位相差が大きくなる。逆に、透過率がディップの点では、反射率がピークを



(a) 透過率及び反射率と構造周期の関係、(b) 位相差と構造周期の関係

図10 透過率、反射率、位相差と構造周期の関係

とり、位相差にもディップが見られる。構造周期 435 nm, 635 nm でファノ共鳴が発生し、その影響で伝搬型の表面プラズモン共鳴が発生し、高い透過率と低い反射率、大きな位相差をとっていると考えられる。一方、435 nm, 635 nm より短周期側ではファノ反共鳴の影響で、表面プラズモン共鳴が阻害される働きが起これ、その影響で透過率が急激に下がり、高い反射率と位相差のディップが得れると考えられる。以上のことから、ファノ共鳴、ファノ反共鳴が透過率、反射率、位相差の偏光特性に大きな影響を与える要因となっていることが考察できる。

(4) 偏光状態の制御

以上の考察を踏まえ、ジョーンズ行列を用いて偏光状態を確認した。

入射波長 635 nm, 表面プラズモン共鳴が起これる付近の構造周期 440 nm での条件で Au の膜厚を 20~100 nm に変化させたとき、式(1)に示すようなジョーンズ行列の値を求め、+45°方位の直線偏光を入射光とし、それぞれの出射光の偏光状態を図に示したものを図11に示す。

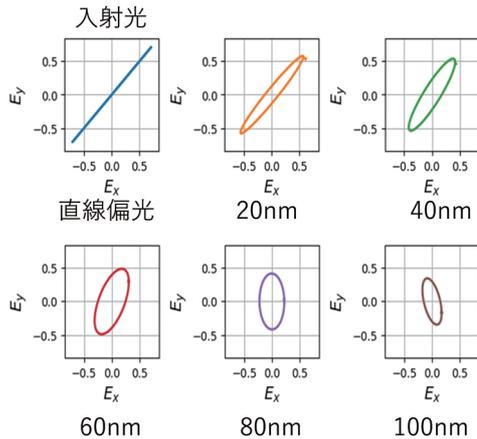


図 11 +45° 方位の直線偏光を入射光としたときの Au 膜厚変化に伴う出射光の偏光変化

試料のジョーンズ行列

$$\begin{pmatrix} t_{TE} & 0 \\ 0 & t_{TM}e^{i\Delta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

t_{TM} t_{TE} TE, TM 波の振幅透過率
 $\Delta = \Delta_{TM} - \Delta_{TE}$ TE, TM 波の位相差

膜厚が増えると透過率が減少し、共に位相遅れが大きくなるため、楕円率が大きくなり、直線偏光が左回りの楕円偏光に変換されることが分かった。この結果から、金属回折格子の構造による表面プラズモン共鳴の発生条件によって、様々な偏光状態を持つ出射光に変換できる偏光制御素子が実現できるものと示唆される。

(5) まとめと今後の課題

眼底検査用偏光 OCT の高性能化を目指すために必要となる偏光制御素子の作製と評価、偏光状態を変換できるメカニズムについて考察を

行った。、プラズモニックメタ表面を用いることで、表面プラズモン共鳴に起因するファノ共鳴、ファノ反共鳴によって透過率と位相差が制御でき、それによって入射光の偏光状態を制御できることを明らかにした。

今後の課題として、プラズモニックメタ表面を用いて偏光状態の制御できることが明らかになったので、実験での検証が必要になる。Au の 1 次元回折格子構造を電子線リソグラフィと真空蒸着によって作製する知見は別の研究テーマで得られているので、この知見を活用し、素子の作製と評価を行う必要がある。

また、1 次元回折格子構造よりも更に高度な偏光制御が可能な 2 次元回折格子状のプラズモニックメタ表面の作製や、より簡便に位相差を実現する方法として 3D プリンターで作製したプラスチック板に引張応力を加えて延伸させたときの位相差測定なども並行して行っている。

[成果の発表、論文など]

〈論文〉

Atsushi Motogaito, Yukino Hayashi, Akinori Watanabe, Kazumasa Hiramatsu, "Fabrication of Polarization Control Devices Using Metal Grating Structures", Optics and Photonics Journal, 12 (9), pp.201-213 (2022).

〈口頭発表〉

Tsubasa Yoshizawa, Kazumasa Hiramatsu and Atsushi Motogaito, "Study on the Design of Polarization Control Devices using a Wire Grid Structure.", The 12th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University, P 22 (2022)