

誘電体/金属層状プラズモン導波路による表面プラズモンポラリトン波長の導波路構造依存性

Dependence of Surface Plasmon Polariton Wavelength on Structure of Dielectric / Metal Layered Plasmon Waveguide

○松本拓也¹, 芦澤好人², 中川活二²*Takuya Matsumoto¹, Yoshito Ashizawa², Katsuji Nakagawa²

Abstract: Fundamental characteristics of wavelength depending on a Surface plasmon polariton (SPP) structure are studied. The SPP is one of the unique conditions to deliver optical energy to a small place, because the SPP has shorter wavelength comparing with that in free space. We focused our study on a layered plasmon waveguide, because the SPP's wavelength can be tunable by such structures. We calculated and evaluated dependences of SPP's wavelength for various dielectric materials in dielectric / metal layered plasmon waveguide.

1. 背景

表面プラズモンポラリトン (以下 SPP と略す) は真空中の光よりも短い波長で伝搬し, 真空中での回折限界よりも小さい領域に集光することが可能であることから, ナノメートルオーダーの局所光加熱^[1] や微小光パターンの形成などの新規光デバイスへの応用が検討されている. 金属表面を伝搬する SPP を局所領域に収束するためには SPP の波長を制御することが必要となる. そこで我々は SPP の伝搬する界面近傍に配置する金属構造物の厚さや位置により波長を短くできることに着目した. 本検討では計算機シミュレーションを用いて, 誘電体/金属層状プラズモン導波路において種々の誘電体材料を採用したときの SPP の波長を解析し, 誘電体材料の屈折率に対する層状プラズモン導波路の等価的屈折率 n_{eff} の関係を調査した.

2. シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを Figure 1 に示す. 誘電体/金属層状プラズモン導波路の構造を SiO_2 sub. / Au (50 nm) / [X (30 nm) / Au (50 nm)]₁₀ とした. 誘電体層 X には, Vacuum (屈折率 $n=1$), SiO_2 ($n=1.5$ ^[2]), Al_2O_3 ($n=1.7$ ^[3]), Si-N ($n=1.995$ (薄膜実測値)), $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($n=2.17$ ^[4]) の 5 通りを検討した. 波長は誘電体層の伝播方向 x における電界瞬時絶対値から算出し 10 層の平均値を用いて評価を行った. 層状導波路への SPP の入射条件は SiO_2 sub. / Au (50 nm) / Vacuum のクレッチマン構造により SPP を励起し層状導波路へ入射した. 光源は誘電体 SiO_2 領域に $1600 \text{ nm} \times 1600 \text{ nm}$ の大きさで配置し, 振幅 1 V/m , 真空波長 780 nm , 入射角 45° の TM 波の連続光を, 厚さ 50 nm の Au に対して照射した. 解析には Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いた. メッシュサイズは 10 nm , 境界に Mur の 1 次吸収境界条件を用いた.

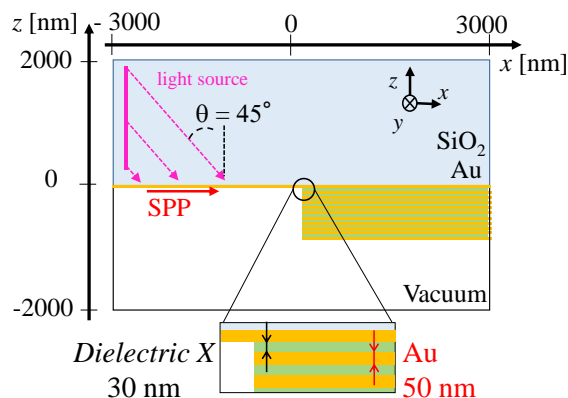


Figure 1 Simulation model evaluating the wavelength of SPP.

3. 種々の誘電体材料による誘電体/金属層状プラズモン導波路中の SPP 波長

種々の誘電体材料を採用したときの誘電体/金属層状プラズモン導波路における SPP の波長変化を評価する. Figure 2 (a)から(e) に, それぞれ誘電体層 X が Vacuum, SiO_2 , Al_2O_3 , Si-N, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ の場合の, 伝搬方向 x に対する電界絶対値の分布図を示す. x が負の領域には Au / Vacuum 単層界面が, x が正の領域には誘電体 X / Au 層状プラズモン導波路が設置してある. すべての結果において, X / Au 層状プラズモン導波路内の SPP の波長は Au / Vacuum 単層界面の波長 $\lambda_{\text{Au/vac}}$ よりも短くなっている. Figure 2 から算出した X / Au 層状プラズモン導波路の 10 層の SPP の平均波長 λ_X は, それぞれ $\lambda_{\text{vac}} = 498 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{SiO}_2} = 322 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 278 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Si-N}} = 236 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}} = 207 \text{ nm}$ となった. 予想通り誘電体層の屈折率が高くなる

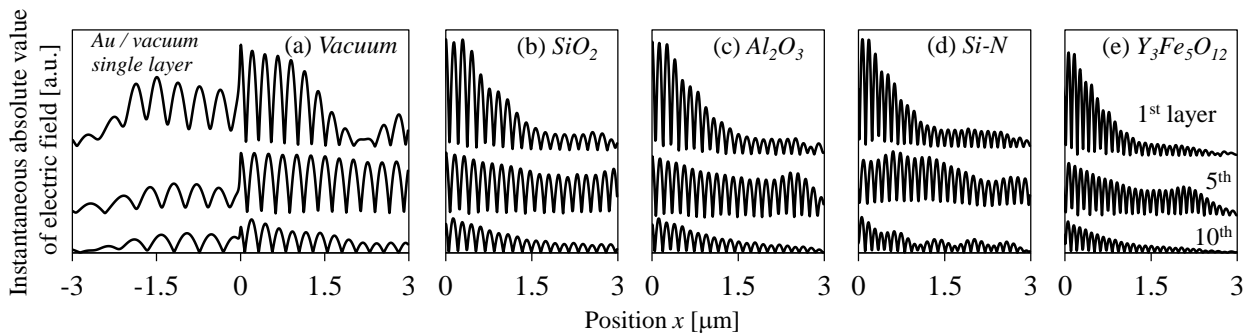


Figure 2 Distribution of the instantaneous absolute value of electric field propagating to the x -direction in dielectric X / Au layered plasmon waveguide.

ほど波長が短くなるという結果が得られた。

等価的屈折率 n_{eff} は Au / Vacuum 単層界面の SPP の波長 $\lambda_{\text{Au/vac}}$ と、誘電体層の材料を X としたときの X / Au 層状プラズモン導波路の SPP の波長 λ_X を用いて、式 $n_{\text{eff}} = \lambda_{\text{Au/vac}} / \lambda_X$ から算出した。誘電体層の屈折率 n に対する層状プラズモン導波路の等価的屈折率 n_{eff} を Figure 3 に示す。 n_{eff} が n に対して線形に変化していることがわかった。この結果は誘電体層に電圧印加によって屈折率が変化する非線形光学効果 (ポッケルス効果) を有する材料を採用することにより、層状プラズモン導波路の SPP の波長を外部から制御できる可能性を示している。

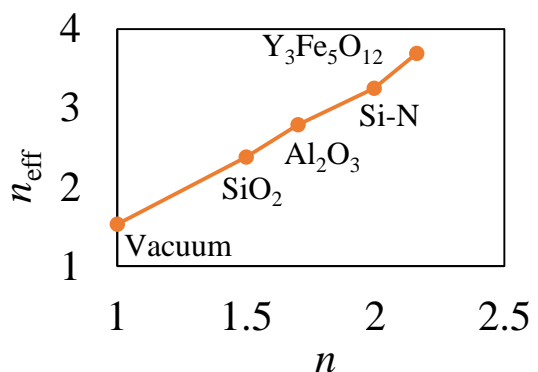


Figure 3 Distribution of the effective refractive index n_{eff} as function of refractive index n of dielectric X

4. まとめ

表面プラズモンポラリトン(SPP)を局所領域に収束する SPP 光デバイスの設計を目的に、FDTD法を用いて誘電体/金属層状プラズモン導波路において種々の誘電体材料を採用したときの SPP の波長を解析し、誘電体材料の屈折率に対する層状プラズモン導波路の n_{eff} の関係を調査した。Au / Vacuum 単層界面の波長 $\lambda_{\text{Au/vac}}$ は 766 nm、 X / Au 層状プラズモン導波路の SPP の波長の 10 層の平均値 $\lambda_{\text{vac}} = 498$ nm、 $\lambda_{\text{Y3Fe5O12}} = 207$ nm となり、層状導波路において SPP の波長が短くなり、また誘電体層の屈折率が高くなるほど波長が短くなるという結果が得られた。誘電体層の屈折率 n に対する層状プラズモン導波路の等価的屈折率 n_{eff} の関係を調査し、線形に変化していることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、平成 25～29 年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1311020)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 林慶彦, 田村京介, 芦澤好人, 大貫進一郎, 中川活二:「金属薄膜端部における表面プラズモンの伝搬解析およびプラズモニック導波路への応用」, 第 38 回日本磁気学会学術講演会概要集, p. 130, 2014.
- [2] Edward D. Palik, ed., Handbook of Optical Constants of Solids 1, (Academic Press, San Diego, 1998).
- [3] Edward D. Palik, ed., Handbook of Optical Constants of Solids 3, (Academic Press, San Diego, 1998).
- [4] LB New Serise 3/12a Magnetic Oxides and Related Compounds Part a, K.-H. Hellwege, ed., (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1978)