

光相変化材料を含む導波路による超高速プラズモンパルスの周波数制御

Frequency Control of Ultrafast Plasmon Pulses

by a Plasmonic Waveguide Consisting of Phase Change Material.

小島康裕 (M1)

Kojima Yasuhiro

Abstract

We numerically demonstrate SPP (surface plasmon polariton) pulse propagation in various shapes of waveguide. The propagation characteristics are determined by the waveguide structures as well as by the substrate. I propose SPP waveguide consisting of a phase change material such as GST, which can be switched its phase between crystal and amorphous by laser irradiation. The characteristics of SPP propagation along the waveguides also can be changed by laser irradiation.

1. はじめに

表面プラズモンポラリトン(SPP)は、金属ナノ粒子中の自由電子の局所的な振動であり、回折限界以下の領域での光電場の閉じ込め、増強効果を可能にする。局在表面プラズモン共鳴の時間域における特性はそれを励起するレーザーパルスにも依存する。この依存性を利用し、波形整形したフェムト秒レーザーパルスによって局在プラズモンパルス場の時空間制御が可能であることを Brixner らは理論的に示しており[1]、最近我々はこれを実験的に証明している[2]。また、SPP の伝搬制御も同様にして実証した。回折限界以下に局在したまま伝搬する SPP は光回路の集積化を可能にする現象として大きな注目を集めている。また、SPP は適切な構造を伝搬させることによって論理ゲートとして働くことがすでに

実証されており、さらなる発展が望まれている[3,4]。

SPP の周波数制御を能動的に導波路伝搬中に行うことで、周波数選択や論理ゲートなど機能を持つ導波路の実現できる。さらに導波路の構成要素の一部を GST などの光相変化材料にすることによって、その相状態の変化に伴う導波路機能のスイッチングが期待できる。GST はプラズモンを介して相変化させられることが実証されており、これによって回折限界以下の領域を局所的に相変化させることもできる[5]。これらは、相変化材料と SPP 導波路を組み合わせることによって新たな書き換え可能な光論理ゲートや記憶素子などをプラズモニック回路上で実現できることを示唆している。相変化材料と SPP 導波路を組み合わせた構造についてはスイッチング機能を実証した例がすでにある[6]。これは 1500 nm 帯の SPP 導波路の伝搬部に GST を設置し、この GST をレーザーによって相変化させることによりスイッチング機能を実現したものである。この帯域でおおきくなる GST の吸収特性の差を利用している。

そこで本研究ではこういった光相変化材料を含む様々な導波路構造について FDTD 法による SPP 伝搬シミュレーションを行い、その特性について調査した。

2. シミュレーション方法

プラズモニック導波路はその構成要素, 構造などによってさまざまな種類がある. Fig. 1 にいくつかの導波路構造を示す.

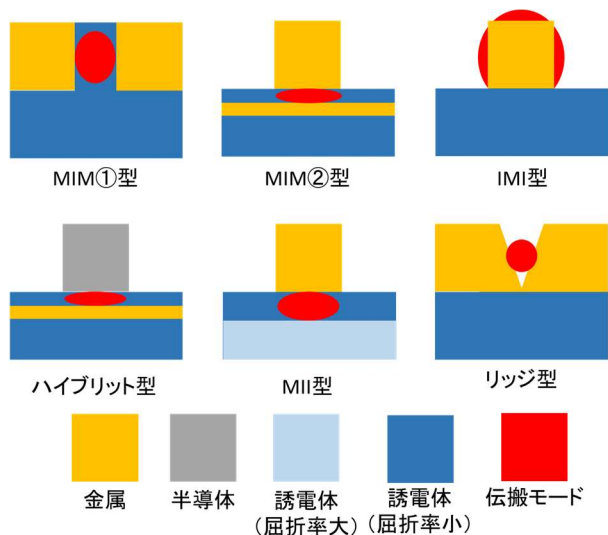


Fig. 1 Plasmonic waveguides

次に示すように、リッジ型以外の、SPPの伝搬モードが誘電体部の影響を大きく受けると予想されるの導波路について数値計算を行った. 計算は、富士通社製の Poynting for Optics という FDTD法を用いた電磁場解析ソフトを用いた.

励起光はチタンサファイアフェムト秒レーザを想定し、中心波長 800 nm, 帯域 200 nm, パルス幅 < 10 fs の超広帯域パルスである.

これら数値計算において、導波路は真空中に存在するものであると想定しおり、導波路の誘電体部分が SiO₂ もしくは光相変化材料である GST で構成される構造について数値計算を行った. GST についてはアモルファス相, 結晶相の 2 つの状態についてそれぞれシミュレーションを行った. 導波路金属部分は Au(ドルーデモデル), 基板となる誘電体部は SiO₂(屈折率: 1.45), GST(ドルーデ・ローレンツモデル), 半導体部分は ZnO(ローレンツ・ドルーデモデル) とした. 構造を次に示す.

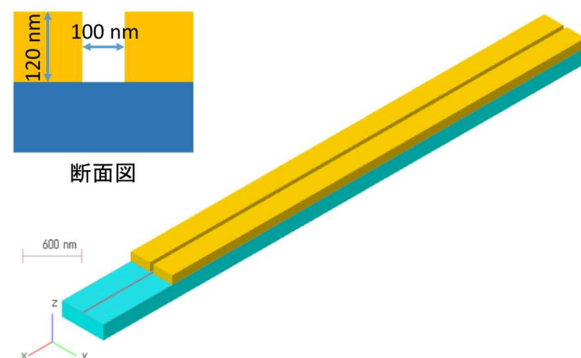


Fig. 2 MIM① plasmonic waveguide

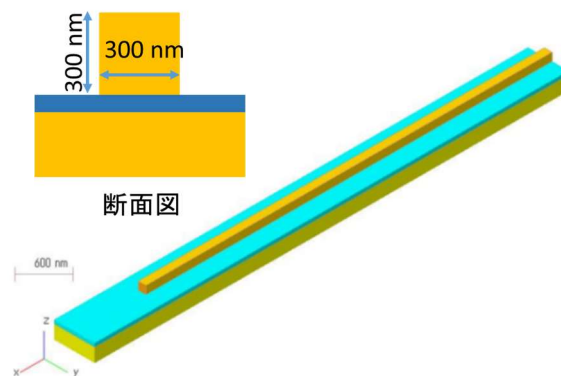


Fig. 3 MIM② plasmonic waveguide

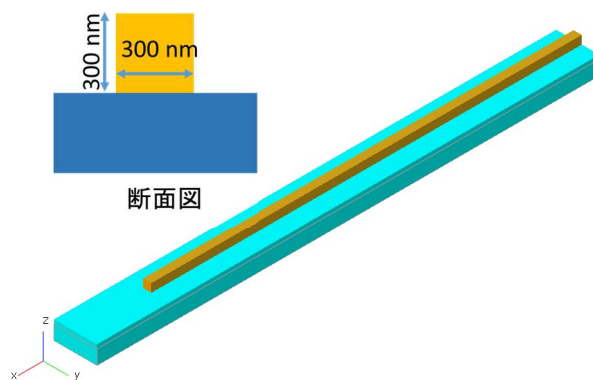


Fig. 4 NW plasmonic waveguide

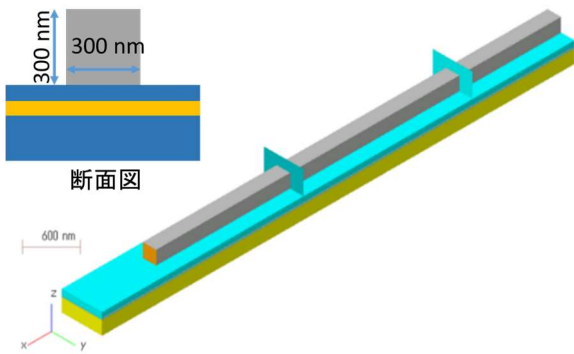


Fig. 5 Hybrid plasmonic waveguide

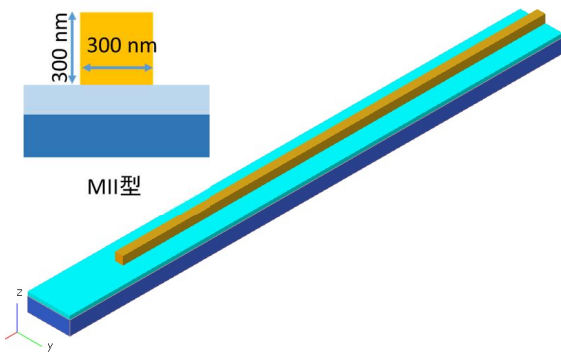


Fig. 6 MII plasmonic waveguide

3. シミュレーション結果

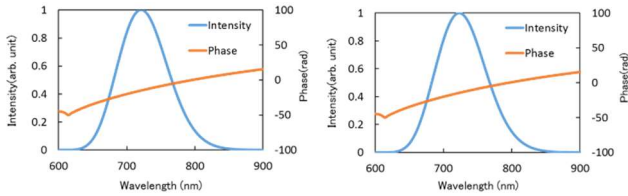
以上5種類の導波路について数値計算を行った結果を次に示す. まず Tabel 1 に各導波路を伝搬する SPP の電磁界強度分布の数値解析結果を示す. なお下例は GST 基板が結晶相時の結果である. MII 型については2種類の誘電体を必要とし, GST と SiO₂ 組み合わせた構造としているために Table 1 上段には計算結果を示していない.

Table1 に示したように基板を SiO₂ から GST に変更したことで, SPP の電磁界分布が異なっていることが分かる. 特に MIM 型①, NW 型以外では基板の違いに伴う電磁界分布の変化が激しい. これは GST における電磁場の吸収が大きいため, それ以外の部分に局在した SPP が伝搬するためである. MIM 型①において, 基板が GST のとき SPP は空気側(上方)のほうが強い強度をもち, 下方ではその強度が弱くなっていることが分かる. これも同様に GST による吸収の影響である.

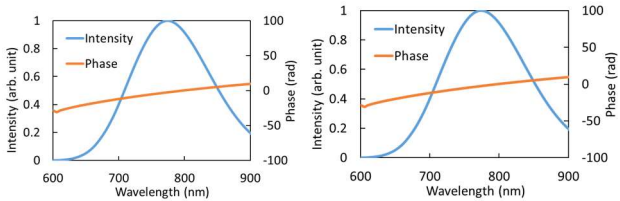
Table 1 Results of simulations (Electric field)

	MIM 型①	MIM 型②	NW 型	ハイブリッド型	MII 型
導波路 基板 (SiO ₂)					
導波路 基板 (GST)					

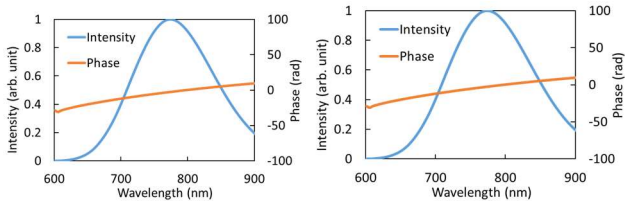
次に導波路を $3\mu\text{m}$ 伝搬した後の SPP のスペクトル計算結果を GST の相の状態が結晶相, アモルファス相について示す.



(a)Crystal (b)Amorphous
Fig. 7 Spectrum of SPP pulse (MIM①)



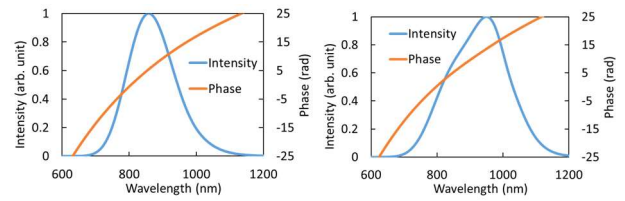
(a)Crystal (b)Amorphous
Fig. 8 Spectrum of SPP pulse (MIM型②)



(a)Crystal (b)Amorphous
Fig. 9 Spectrum of SPP pulse (NW)

以上に示した導波路では結晶相, アモルファス相で SPP の伝搬特性に変化がなく, GST 基板の相状態の変化の影響を受けないということが分かる. これは伝搬モードが GST から離れて, 多くが空気と金属の界面を伝搬しているためである.

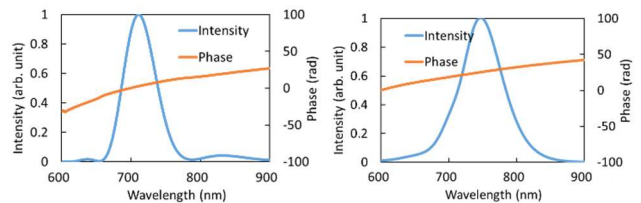
一方でハイブリット型では次のような結果が得られた.



(a)Crystal (b)Amorphous
Fig. 10 Spectrum of pulse (Hybrid)

これらの結果から GST の相状態によってその伝搬特性が変わることが分かった. しかし, table 1 からわかるように伝搬モードは金属とカップリングしていない. つまりこれは SPP ではなく, 半導体中を伝搬する光波モードとなっている.

次に MII 型の導波路における SPP 伝搬特性の解析結果を示す.



(a)Crystal (b)Amorphous
Fig. 11 Spectrum of SPP pulse (MII)

Fig. 11 に示したようにその伝搬特性に明らかな違いがある. この構造では SPP の伝搬モードが存在する位置に近接して GST があるためその影響を強く受けているためである.

4. まとめ

FDTD 法による数値計算によって, 様々な導波路における SPP の伝搬特性を明らかにした. また, 光相変化材料である GST を一部とする導波路において GST の相状態の違いによる SPP の伝搬特性を明らかにした. これらの結果から多くの導波路形状に

において SPP は GST の相変化の影響を受けないことが示された. 一方で MII 型のような導波路構造にすることで SPP が GST の相変化の影響を受けるようになることが示された.

これは導波路を伝搬する SPP の伝搬特性を, 光相変化材料の相状態を変化させることで, 制御することが可能となることを示している. また GST 基板を結晶相, アモルファス相のパターン化したより複雑な基板状態を実現することができれば, より自由度の高い SPP 伝搬特性の制御が可能となるだろう. これは伝搬特性を測定することによって基板状態を読み込むなどの記憶素子として, もしくは書き換え可能な光論理ゲートとして機能する可能性がある.

References

- [1] J. S. Huang, D. V. Voronine, P. Tuchscherer, T. Brixner, and B. Hecht, "Deterministic spatiotemporal control of optical fields in nanoantennas and plasmonic circuits," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 79, 1–5 (2009).
- [2] S. Onishi, K. Matsuishi, J. Oi, T. Harada, M. Kusaba, K. Hirosawa, and F. Kannari, "Spatiotemporal control of femtosecond plasmon using plasmon response functions measured by near-field scanning optical microscopy (NSOM)," *Opt. Express* 21, 26631–26641 (2013).
- [3] Y. Fu, X. Hu, C. Lu, S. Yue, H. Yang, and Q. Gong, "All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides," *Nano Lett.* 12, 5784–5790 (2012). T. Birr, U. Zywiets, P. Chhantyal, B. N. Chichkov, and C. Reinhardt, "Ultrafast surface plasmon-polariton logic gates and half-adder," *Opt. Express* 23, 31755 (2015).
- [4] T. Hira, T. Uchiyama, K. Kuwamura, Y. Kihara, T. Yawatari, and T. Saiki, "Switching the Localized Surface Plasmon Resonance of Single Gold Nanorods with a Phase-Change Material and the Implementation of a Cellular Automata Algorithm Using a Plasmon Particle Array," *Adv. Opt. Technologies* 2015, 150791 (2015).
- [5] T. Hira, T. Uchiyama, K. Kuwamura, Y. Kihara, T. Yawatari, and T. Saiki, "Switching the Localized Surface Plasmon Resonance of Single Gold Nanorods with a Phase-Change Material and the Implementation of a Cellular Automata Algorithm Using a Plasmon Particle Array," *Adv. Opt. Technologies* 2015, 150791 (2015).
- [6] M. Rudé, R. E. Simpson, R. Quidant, V. Pruneri, and J. Renger, "Active Control of Surface Plasmon Waveguides with a Phase Change Material," *ACS Photonics* 2, 669–674 (2015).