

プラズモニック導波路を用いた光分岐デバイスの検討 Investigation of an Energy Splitting Device Using Plasmonic Waveguides

○影山雄一¹, 竹内嵩², 大貫進一郎³, 羽柴秀臣³, 井上修一郎³*Yuichi Kageyama¹, Takashi Takeuchi², Shinichiro Ohnuki³, Hideomi Hashiba³, Shuichiro Inoue³

Abstract: Investigation of plasmonic waveguides has plays an important role in efficient energy transmission and high integration of the optical circuit. In this report, we will examine energy splitting and transmission efficiency of the plasmonic waveguide composed of multiple metal stripes.

1. はじめに

近年, 光回路の高集積化に向けて, エネルギーを狭い領域に閉じ込めて伝搬させるプラズモニック導波路が注目を集めている^[1-5]. 本報告では, プラズモニック導波路を用い, 光をナノ領域で分岐可能なデバイスの設計を行い, 分岐の割合と伝送効率について検討を行う.

2. 解析モデル

光分岐デバイスの設計には ADE-FDTD 法を用いる^[6]. 本手法は次式で示す Maxwell 方程式を時間領域, 空間領域で差分化を行う.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

ここで, \mathbf{E} は電界, \mathbf{B} は磁束密度, \mathbf{H} は磁界, \mathbf{D} は電束密度, \mathbf{J} は電流密度である. また, 金属ストライプの周波数分散性は Drude モデルとし, 電流密度 \mathbf{J} は次式で計算を行う.

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\nu \mathbf{J} + \varepsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E} \quad (3)$$

このとき ν は衝突周波数, ω_p はプラズマ角周波数, \mathbf{E} は金属内部の電界である.

本報告では, Fig. 1 に示す SiO₂ 中に 2 枚の金属ストライプ S₁ および S₂ を配置したプラズモニック導波路について電磁界解析を行う. また, 金属ストライプの媒質は Au とし, 波源から表面プラズモンを +x 方向に励振する.

このとき, 入射位置からの距離 D_1 および D_2 に対して, エネルギーが 2 枚の金属ストライプに分岐する割合を検討をする. エネルギーの分岐は次式で与える S₁ および S₂ 上の分極電荷密度で評価する.

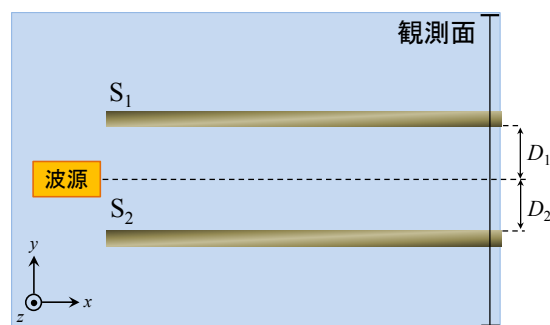
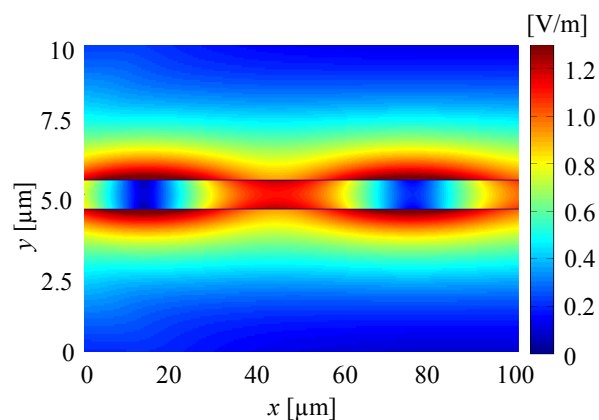
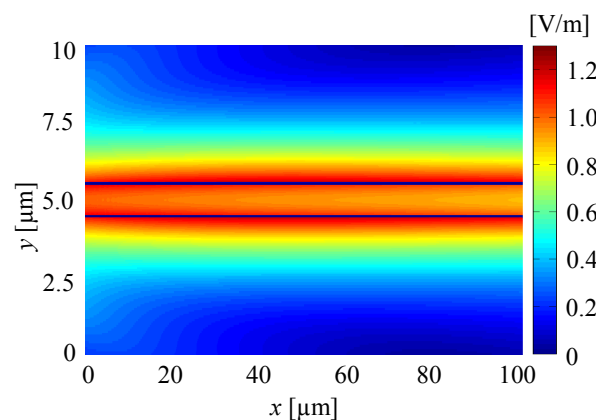


Figure 1. Geometry of an energy splitting device



(a) Thin stripes



(b) Thick stripes

Figure 2. Distribution of the electric field intensity in the case of $D_1 = D_2 = 500$ nm

$$\rho = \int_t \left| \frac{(P_{(x+1)} - P_x)}{\Delta x} + \frac{(P_{(y+1)} - P_y)}{\Delta y} \right| dt \quad (4)$$

ここで、 P_x は x 方向の分極ベクトル、 P_y は y 方向の分極ベクトル、 Δx は x 方向の長さ、 Δy は y 方向の長さである。また、伝送効率を入力したエネルギーと出力されたエネルギーから計算を行う。

3. 解析結果

Fig. 2 (a) に D_1 と D_2 が等しく、金属ストライプの厚さが薄い場合での S_1 および S_2 近傍の電界強度分布を示す。入射位置からの距離が等しいため、2 枚のストライプに等しくエネルギーが遷移していることがわかる。また、導波路近傍では、 x 方向における位置の変化により電界強度が異なる。

Fig. 2 (b) に金属ストライプを 5 倍程度厚くした場合の電界強度分布を示す。こちらも遷移したエネルギーが等しいことがわかる。このとき、プラズモニック導波路上での伝送損失は約 2 割程度であることを確認した。また、 x 方向の変化に対して、導波路近傍で一定の強度になっていることがわかる。これは、金属ストライプを厚くしたことにより各ストライプ近傍での光の集中度が増し、 S_1 と S_2 間での相互作用が弱くなったためである。以降での解析では、測定する位置によらず電界が一定である金属ストライプが厚い場合でのモデルについて検討を行う。

Fig. 3 に $D_1 = 1500 \text{ nm}$ 、 $D_2 = 100 \text{ nm}$ とした場合の電界強度分布を示す。入射位置からの距離が非対称なため、 S_1 と S_2 に遷移するエネルギーが異なることがわかる。このとき、入射位置からの距離に近い S_2 側の方が電界強度が高いことがわかる。また、 S_2 の分極電荷密度は S_1 の 1.52 倍となっており、分岐の割合が大きく変わったことがわかる。このとき、伝送損失は約 3 割程度となっており、入射位置から離れることで伝送効率は下がることを確認した。

4. まとめ

プラズモニック導波路を用いた光分岐デバイスの検討を行った。2 枚の金属ストライプの形状変化に対する相互作用について解析した。入射位置からの距離によるエネルギー分岐と伝送効率の関係について検討し、 $D_1 = 1500 \text{ nm}$ 、 $D_2 = 100 \text{ nm}$ の場合、 S_2 の分極電荷密度は S_1 の 1.52 倍となることを確認した。

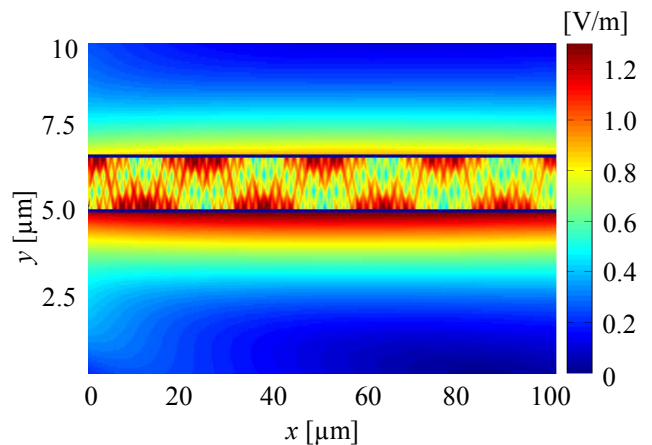


Figure 3. Distribution of the electric field intensity in the case of $D_1 = 1500 \text{ nm}$ and $D_2 = 100 \text{ nm}$

5. 謝辞

本研究の一部は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

6. 参考文献

- [1] Y. Kageyama, S. Sekiguchi, T. Takeuchi, S. Ohnuki and S. Inoue, Proceedings of the 2014 IEICE Society Conference, C-15-12, pp.219, Sep, 2014.
- [2] S. Ohnuki, Y. Kageyama, Y. Sekiguchi, T. Takeuchi and S. Inoue: "Fundamental Study on Energy Transmission Efficiency of Multiple Plasmonic Waveguides" IEICE Technical Report, EST2014-2, pp. 7-10, May. 2014.
- [3] Y. Kageyama, S. Sekiguchi, T. Takeuchi, S. Ohnuki and S. Inoue, Proceedings of the 2014 General Conference, C-15-12, pp.305, Mar, 2014.
- [4] S. Ohnuki, Y. Sekiguchi, G. Fujii, and S. Inoue: "Fundamental Investigation of a Photodetector Using Nb Wire and Metal Stripe" IEICE Technical Report, EST2013-112, pp. 193-196, Jan.2014.
- [5] S. Ohnuki, Y. Sekiguchi, G. Fujii, and S. Inoue: "Design of Plasmonic Devices for Novel Photodetectors" *Proc. of AP-RASC.*, 290606, Sept.2013.
- [6] T. Yamaguchi, and T. Hinata, "Optical near-field analysis of spherical metals, Application of the FDTD method combined with the ADE method," *Opt. Express*, 15, pp.11481-11491, 2007.