

金属導波路間のエネルギー結合効率の検討

Investigation of Energy Coupling Efficiency between Metal Waveguides

○影山雄一¹, 上垣将洋¹, 大貫進一郎², 羽柴秀臣³, 井上修一郎³*Yuichi Kageyama¹, Masahiro Kamigaki¹, Shinichiro Ohnuki², Hideomi Hashiba², Shuichiro Inoue²

Abstract: Recently, design of plasmonic waveguides has attracted attention; the high integration of optical devices is expected by using the waveguides. However, energy efficiency and concentration ratio of those devices are changed by shape of waveguides. In this report, we evaluate energy coupling efficiency of between the metal waveguides.

1. はじめに

近年、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されており、導波路を用いることによって光デバイスの高集積化が期待されている^[1-2]。しかし、導波路の形状によってエネルギー効率や集中度は大きく変化してしまう^[3]。本報告では、形状を変化させた際の金属導波路間のエネルギー結合効率について検討する。

2. 解析モデル

本報告では、金属の周波数分散性を考慮するため ADE-FDTD 法を用いる^[4]。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。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{E}$ は電界、 $\mathbf{H}$ は磁界、 $\mathbf{J}$ は電流密度である。また、金属導波路の周波数分散性は Drude モデルとし、次式で与えられる電子の運動方程式を差分化して FDTD 法に組み込む。

$$m \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + m\nu \frac{d\mathbf{u}}{dt} = q\mathbf{E} \quad (3)$$

ただし、 m は電子の有効質量、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトル、 ν は衝突周波数、 q は電子の素電荷である。

本報告では、Fig. 1 に示す SiO_2 中に 3 枚の金属導波路 S_1 , S_2 および S_3 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、金属導波路の媒質は Au とし、+x 方向に伝搬する表面プラズモンを励振する。このとき、導波路間距離 l を変化させ S_1 上を伝搬するエネルギーが S_2 および S_3 へ結合する効率について

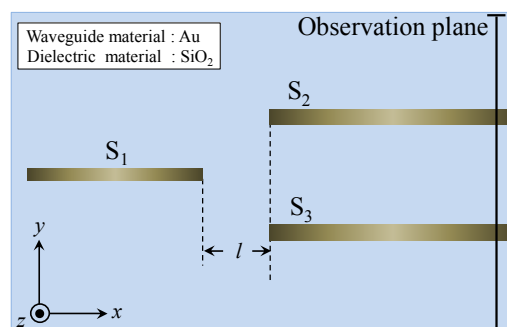


Figure 1. Geometry of the metal waveguides

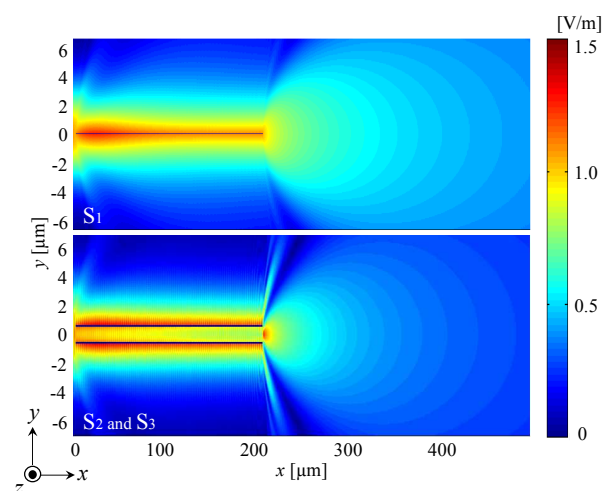


Figure 2. Distribution of the electric field intensity

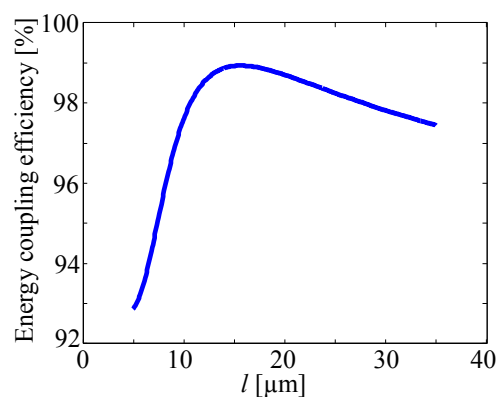


Figure 3. Energy coupling efficiency

検討を行う．金属導波路間のエネルギー結合効率は次式により評価する^[5]．

$$C = \frac{\left| \int_l \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 dl \right|^2}{\left(\int \mathbf{E}_1^2 dl \int \mathbf{E}_2^2 dl \right)} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{E}_1$ は S_1 からの放射電界、 $\mathbf{E}_2$ は S_2 および S_3 からの放射電界である．

3. 解析結果

Fig.2 に S_1 からの放射電界と S_2 および S_3 からの放射電界を示す．それぞれ伝搬距離 200 μm 付近の端部からエネルギーが放射していることがわかる．

Fig.3 に金属導波路の放射電界から計算したエネルギー結合効率を示す．導波路間距離 $l = 15 \mu\text{m}$ で結合効率が 99 % となることを確認した．

Fig.4 に導波路間距離 $l = 15 \mu\text{m}$ の場合の金属導波路 S_1 、 S_2 および S_3 の電界強度分布を示す． S_1 から放射したエネルギーが S_2 および S_3 へ高効率で結合していることを確認した．

Table1 に導波路間距離 $l = 5 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ での導波路内部の分極電荷密度を示す．分極電荷密度は次式によって評価を行った．

$$\rho = \int_l \left| \frac{(P_{(x+l)} - P_x)}{\Delta x} + \frac{(P_{(y+l)} - P_y)}{\Delta y} \right| dt \quad (5)$$

ただし、 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． $l = 15 \mu\text{m}$ の場合の分極電荷密度は $3.82 \times 10^{-20} \text{ C/m}^2$ となり、エネルギー結合効率と分極電荷密度が同様の傾向となることを確認した．

4. まとめ

金属導波路間の結合効率について検討を行った．導波路間距離 $l = 15 \mu\text{m}$ の場合において結合効率が 99 % となることを確認した．また金属導波路 S_1 、 S_2 および S_3 の電磁界解析において、導波路間距離 $l = 15 \mu\text{m}$ のとき分極電荷密度が $3.82 \times 10^{-20} \text{ C/m}^2$ となり、結合効率と分極電荷密度が同様の傾向となることを確認した．

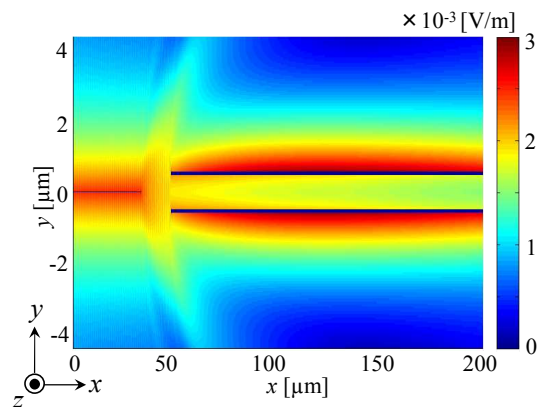


Figure 4. Distribution of the electric field intensity when $l = 15 \mu\text{m}$

Table.1 Distance between the metal waveguides and polarization charge density

$l [\mu\text{m}]$	Polarization charge density $[\text{C/m}^2]$
5	3.78×10^{-20}
15	3.82×10^{-20}
20	3.80×10^{-20}

5. 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] M. Kamigaki, Y. Kageyama, S. Ohnuki, H. Hideomi and S. Inoue : "Investigation of Coupling Efficiency in Optical Waveguides -The Case of Optical Fibers and Plasmonic Waveguides-", Proc. of the 2015 IEICE Society Conference, C-15-10, pp.201, 2015.
- [4] 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.
- [5] R. Charbonneau, C. Scales, I. Breukelaar, *Member, OSA*, S. Fafard, N. Lahoud, G. Mattiussi, and Pierre Berini *Member, IEEE, Member, OSA* : "Passive Integrated Optics Elements Based on Long-Range Surface Plasmon Polaritons" , JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY , Vol. 24 , No.1 , pp.477-494, January.2006.