L-11

高集積光デバイスに向けたプラズモニック導波路の電磁界解析 -誘電体に金属細線を埋め込んだ構造-EM Analysis of Plasmonic Waveguides for Highly Integrated Optical Devices -Structure of Metallic Nano Wires Embedded in Dielectrics-

○上垣将洋1, 大貫進一郎2, 井上修一郎3

*Masahiro Kamigaki¹, Shinichiro Ohnuki², Shuichiro Inoue³

Abstract : With advanced in nanotechnology, plasmonic waveguides have attracted attention because they can concentrate light at a tiny area beyond the diffraction limit. In this report, we will analyze cylindrical plasmonic waveguides for high integrated optical devices using electromagnetic simulation.

1. はじめに

近年,回折限界を超えて光を集中させることのでき るプラズモニック導波路が注目を集めている.著者ら は高効率光検出器や光分岐デバイスの設計に向けて, 金属ストライプの検討を行ってきた^{[1][2]}.

本稿では,新たな光集積デバイスの実現に向け,柱 状プラズモニック導波路の形状変化及び入射光の偏波 変化に対する影響を電磁界解析により明らかにする.

2. 解析手法

電磁界解析手法には,時間領域有限差分法(Finite Difference Time Domain; FDTD)を用いる. FDTD 法は次 式で与えられる Maxwell 方程式を時間及び空間領域で 差分し,逐次計算する数値解析手法である.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \,\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \,\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \tag{2}$$

ここで E は電界, H は磁界, J は電流密度である. プ ラズモニック導波路に用いる金属の周波数分散性は Drude モデルとし, (3)式により誘電率の計算を行う.

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + jv_0)}$$
(3)

また,(4)式で与えられる電子の運動方程式を離散化し, 補助微分方程式として FDTD 法に組み込む^[3].

$$m\frac{d^2u}{dt^2} + m\nu\frac{du}{dt} = qE$$
(4)



Figure 1 Computational model



(a) a = 20 nm, b = 20 nm (b) a = 20 nm, b = 80 nm Figure 2 Electric field distribution ($d = 15 \mu$ m)



1:日大理工・院(前)・電気 2:日大理工・教員・電気 3:日大・教員・量子科学研究所

3. 解析結果

Fig. 1 に本解析モデルを示す. 検討するプラズモニッ ク導波路は円柱状の金属(コア)を同形状の誘電体(クラ ッド)で取り囲んだものである.ここで金属は Au, 誘 電体は SiO₂ とし, 波長 1550 nm の光を入射波として導 波路端部から z 方向に伝搬させる.また, 金属の断面 において x 方向の幅を a, y 方向の幅を b とする. 3.1.金属の形状を変化させた場合

Fig. 2 (a)はa = 20 nm, b = 20 nm, (b)はa = 20 nm, b = 80 nm とし, 直線偏波を入射した時のプラズモニック 導波路断面における電界強度分布である. 解析結果よ り,金属と誘電体界面において入射波の偏波方向にの み電界が集中していることがわかる. また, Fig. 2 (b) の結果から,金属の形状を楕円形状にすることで長軸 方向に電界がより強く集中することが確認できた. 3. 2.入射波の偏波を変化させた場合

入射波を円偏波とし、柱状プラズモニック導波路の 金属形状を変化させて電磁界解析を行った. Fig. 3 に おいて、(a)はa = 20 nm、b = 20 nm、(b)はa = 20 nm、b= 80 nm とした時のプラズモニック導波路断面におけ る電界強度分布である. Fig. 2 の結果と異なり金属の周 囲に電界が集中していることがわかる.また、金属の 形状変化に対して、上記の結果と同様に楕円形状にす ることで長軸方向に電界がより強く集中した.

Fig. 4 に(a) t = 145 fs 及び(b) t = 152 fs における分極電 荷密度を示す. この結果より,表面プラズモンが金属 の周囲を回転しながら伝搬していることがわかる.

次に,円柱の上部と左部を観測点とした分極電荷密 度の時間応答波形を Fig. 5 にそれぞれ赤と青の点線で 示す.解析結果から,図上で二つの波形の振幅は等し く,位相差が 90°となっていることが確認できた.

4. まとめ

柱状プラズモニック導波路の形状変化及び入射光の 偏波変化に対する影響について電磁界解析により検討 を行った.

金属の断面の形状を楕円形状にすることで,長軸方 向に電界がより強く集中することを確認した.また, 円柱状プラズモニック導波路に円偏波を入射すること で,擬似的な局所円偏光が生成できることを明らかに した.



Figure 4 Polarization charge density ($d = 15 \,\mu\text{m}$)



Figure 5 Time response of the polarization charge density

5. 参考文献

[1] M. Kamigaki, Y. Kageyama, S. Ohnuki, H. Hashiba 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.

[2] S. Ohnuki, Y. Kageyama, M. Kamigaki, H. Hashiba and S. Inoue ; "Design of an Energy Splitting Device Using Multiple Metal Stripes -Plasmon Transmission Efficiency for the Gap between the Stripes-", IEICE Technical Report, EST2015-106, pp. 87-90, January. 2016.

[3] T. Yamaguchi, and T. Hinata : "Optical near-field analysis of spherical metals : Application of the FDTD method combined with the ADE method", Opt Express, Vol. 15, No. 18, pp. 11481-11491, 2007.