

FDFD 法による金属円柱列における表面プラズモンの伝搬解析

—断面形状の変化について—

Propagation Analysis of Surface Plasmon for a Metallic Cylinder Chain by the FDFD Method

-Various Cross Sections of Cylinders-

○呉迪¹, 山口隆志², 大貫進一郎³*Di Wu¹, Takashi Yamaguchi², Shinichiro Ohnuki²

Abstract: In recent years, many plasmonic waveguides and light antennas using metallic chains have been proposed and discussed. In this report, we will simulate and investigate the surface plasmon for a metallic cylinder chain when the shape of the cross section is changed.

1. まえがき

近年, 微小金属粒子を用いたプラズモニック導波路の研究報告が多数されており^[1-3], 様々な分野で注目を集めている. 本報告では, FDFD 法^[4] (Finite-Difference Frequency-Domain Method)を用いて金属円柱列における表面プラズモンの伝搬解析を行い, 断面形状が変化した場合の光学応答について調査する.

2. 解析手法

本研究では, 金属円柱列における表面プラズモンの定常応答を求めるために, 周波数領域の差分法である FDFD 法を用いて解析を行う. また, 本手法においては式(1)に示す Maxwell 方程式を空間について離散化し, 式(2)の連立一次方程式を作成する. この方程式を解くことにより, 金属円柱列の電磁界を求める.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mu_r \mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r \mathbf{E} + \mathbf{J}$$

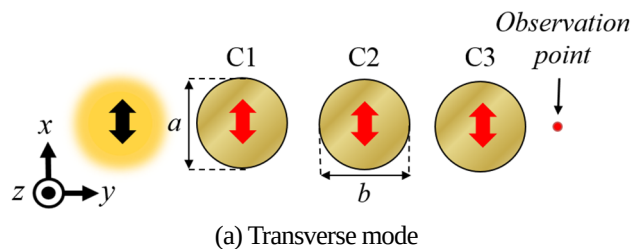
(1)

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & & -j\omega\Delta y & & \\ & 1 & -1 & & -j\omega\Delta y & \\ & & \vdots & \ddots & & \vdots \\ & & \vdots & & 1 & -1 \\ j\omega\Delta y & & & 1 & -1 & \\ & j\omega\Delta y & \ddots & & 1 & -1 \\ & & \vdots & & & \vdots \\ & & \vdots & & & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{x2} \\ E_{x3} \\ \vdots \\ H_{z1} \\ H_{z2} \\ H_{z3} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ J_x \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

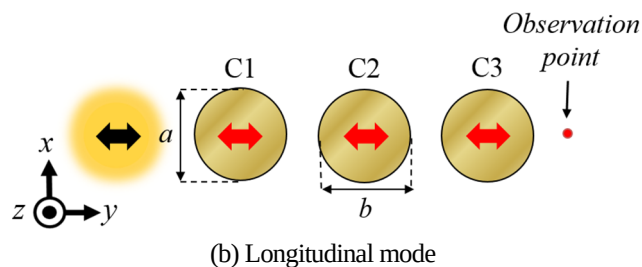
ここで, 時間因子を $e^{j\omega t}$ とする. なお, 本解析では金属の周波数分散性を考慮する必要があるため, 式(3)に示す Drude モデル^[5]を用いて金属の複素誘電率を計算する.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)} \quad (3)$$

ここで, ω_p はプラズマ周波数, ν は自由電子の衝突周波数を示す.



(a) Transverse mode



(b) Longitudinal mode

Figure 1 Computational model of nano-metallic cylinder chain

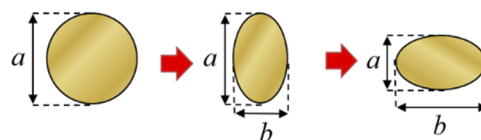
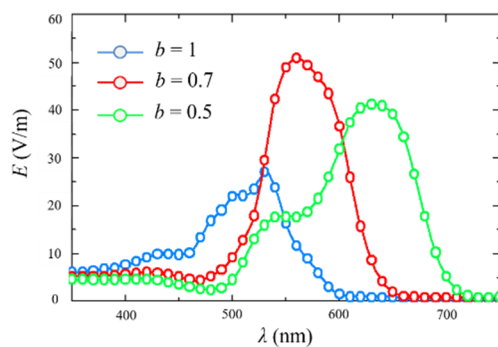


Figure 2 Cross sections of cylinders

Figure 3 Wavelength characteristic for various b
-Transverse mode-

3. 解析結果

Figure 1 に解析モデルを示す. z 方向に一樣な直径 20 nm の金属円柱を y 方向に間隔 10 nm で 3 個配置する. 金属円柱 C1 の中心から $-x$ 方向に 15 nm 離れた位置にダイポール波源を設置し, 金属円柱に表面プラズモンを励起する. また, 観測点は円柱 C3 から y 方向に 1 nm 離れた点とした.

Figure 2 のように, 金属円柱の断面形状が真円から楕円に変化した場合の表面プラズモンをシミュレーションする.

まず, プラズモンの伝搬方向に対して垂直な方向にプラズモンを励振した横モード(Figure 1(a))について解析を行う. a を固定し, b を 1 から 0.7, 0.5 倍に変化させた場合の観測点における電界強度の波長特性を Figure.3 に示す. b の減少に伴い, 共振ピークが長波長側にシフトし, 電界は強くなる. また, 今回の解析において, b を 0.7 倍にする場合, 電界強度のピーク値が最大となることを確認した.

Figure 4 に b を固定し, a を 1 から 0.7, 0.5 倍に変化させた際の波長特性を示す. a の減少とともに, 共振ピークは短波長側にシフトしたが, 電界強度のピーク値はほとんど変わらなかった.

次に, プラズモンの伝搬方向と平行にプラズモンを励振した縦モード(Figure 1(b))について解析を行う. Figure 5 に a を固定し, b を 1 から 0.7, 0.5 倍に変化させた場合の電界強度の波長特性を示す. b の減少とともに, 共振ピークが短波長側にシフトした. 今回の解析では, b を 0.7 倍にした場合, ピークの値が最大となることを確認した.

Figure 6 に b を固定し, a を 1 から 0.7, 0.5 倍に変化させた場合の電界強度の波長特性を示す. b の減少とともに, 共振ピークが長波長側にシフトし, 電界強度のピーク値は大きくなる傾向がわかる.

4. まとめ

FDFD 法を用いて金属円柱列における表面プラズモンの伝搬解析を行った. 金属円柱の断面形状が変化する場合の光学応答について調査し, 共振周波数及びプラズモンの伝搬効率の制御法について報告した.

5. 謝辞

本研究の一部は, 日本大学学術研究戦略プロジェクト及び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.

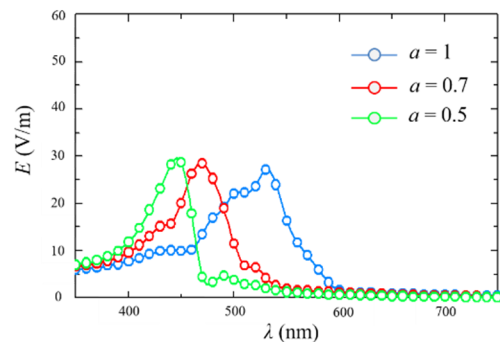


Figure 4 Wavelength characteristic of various a
-Transverse mode-

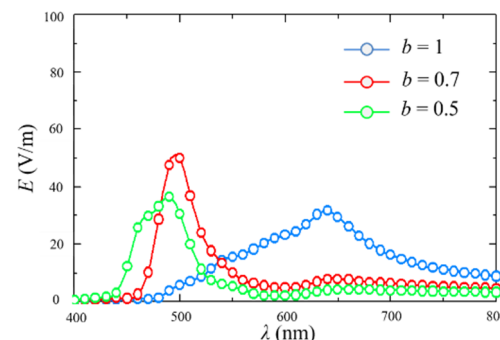


Figure 5 Wavelength characteristic of various b
-Longitudinal mode-

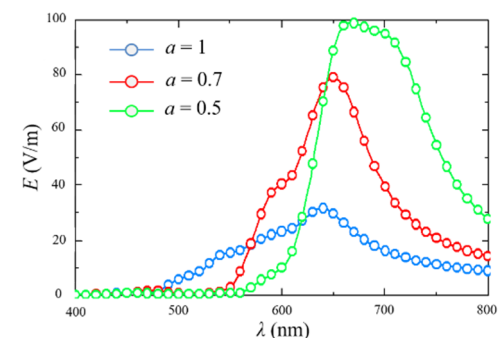


Figure 6 Wavelength characteristic of various a
-Longitudinal mode-

参考文献

- [1] V.Kravets, O. Yeshchenko, V. Gozhenko, L. Ocola, D. Smith, J. Phys. D: Appl Phys., Vol. 45, 045102(8pp), Jan 2012.
- [2] S. A. Maier, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 12, No. 6, pp.1214-1220, Nov. 2006.
- [3] K. Nagasawa, T. Takeuchi, S. Ohnuki, et al., IEICE Electronics Express, Vol.13, No.8, 1-7, 2016.
- [4] V.Demir, Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 23, 29-51 (2012).
- [5] Aleksandar D.Rakic, Aleksandra B. Djuricic, Jovan M. Elazar, and Marian L. M Elazar, and Marian L. Majewska. APPLIED OPTICS Vol 37, No.22. 1 August 1998.