

微小金属柱列の光学応答解析 —ピーク波長と円柱間距離—

Analysis of Optical Responses for Metallic Nano-Cylinder Chains -Peak Wavelength for Varying Cylinder Distance -

○遠藤源博¹, 山口 隆志², 大貫進一郎³* Motohiro Endo¹, Takashi Yamaguchi², Shinichiro Ohnuki³

Abstract: Recently, it is possible to localize light in nano region beyond diffraction limit and propagate light energy to minute metallic cylinders. In this paper, we investigate wavelength responses of plasmonic resonances in metallic cylinders and propose a method to control the resonance for varying the cylinder distance.

1. はじめに

微小金属を配列し、表面プラズモンを利用することでナノ領域に光エネルギーを伝搬することが可能となり、導波路等デバイスの小型化が期待できる[1][2]. 本報告では図 1 に示すような金属柱列におけるプラズモン共鳴波長の解析を行う. また、局在表面プラズモンの伝搬特性と円柱間の相互作用について検討するため、円柱間距離を変化させた場合の波長応答を明らかにする.

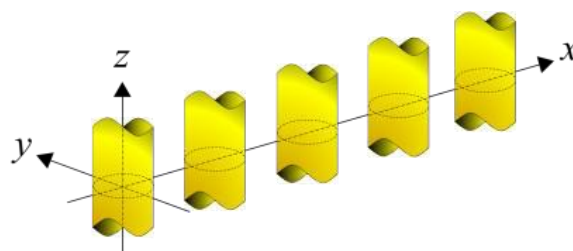


図 1 微小金円柱列

2. 解析手法

本報告では、FDTD (Finite Difference Time Domain)法により、以下に示すMaxwell方程式を解析する.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

式 (1) 及び (2) に中心差分を用いることで次の差分式を得る.

$$\mu_0 \frac{\mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\nabla \times \mathbf{E}^n \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\mathbf{E}^{n+1} - \mathbf{E}^n}{\Delta t} + \mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}} = \nabla \times \mathbf{H}^{n+\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ただし

$$\mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\mathbf{J}^{n+1} + \mathbf{J}^n}{2} \quad (5)$$

ここで n はタイムステップを示す. 式 (3), (4)より、電界の差分式が得られる.

$$\mathbf{E}^{n+1} = \frac{1}{C_{E1} + C_{E2}} \{C_{E1} \mathbf{E}^{n+1} + C_{E2} \mathbf{E}^{n+1} + \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{J}_{HD}^{n,n-2}\} \quad (6)$$

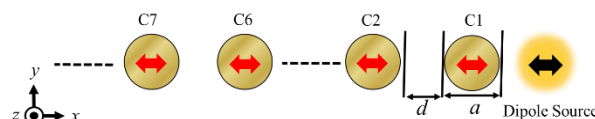


図 2 解析モデル

ただし

$$C_{E1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{\Delta t} \quad (7)$$

$$C_{E2} = \frac{1}{4\Delta t} \quad (8)$$

磁界については以下の差分式より逐次計算を行う.

$$\mathbf{H}^{n+1} = \mathbf{H}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E}^{n+1} \quad (9)$$

金属の周波数分散性は、以下に示す金属の非局所性を考慮した電子の運動方程式を補助方程式としてFDTD法に組み込むことで考慮する.

$$n \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{ne}{m_e} \mathbf{E} - \gamma n \mathbf{v} - \frac{\nabla p}{m_e} \quad (10)$$

ここで \mathbf{v} は電子の変位ベクトル, γ は衝突周波数, n は外部電界によって誘起された電荷の密度, n_0 は平衡状態の電子密度, m_e は電子の有効質量である.

図 2 に微小金属柱列の解析モデルを示す. z 軸に一樣な 2 次元の金属柱を仮定し、円柱直径を $a = 10 \text{ nm}$ 円柱間距離 $d = 5, 10, 20 \text{ nm}$ と変化させて配置する. 励振源として C1 右横にダイポールソースを配置し、電子の振動方向が x 軸となる縦モードのプラズモンを励起させる.

3. 解析結果

本報告では局在表面プラズモンの伝搬特性を検討するため、円柱列の C2 と C7 においてピーク波長の推移を観測する。またダイポールモーメントの値は規格化する。

図 3(a) に円柱間距離 $d=5\text{ nm}$ 時のダイポールモーメントの波長応答結果を示す。C2 のピークは波長 534.0 nm 、C7 のピークは波長 588.7 nm と、波源から離れることにより、 54.7 nm 長波長側にシフトしていることがわかる。次に円柱間距離を 2 倍の $d=10\text{ nm}$ にした際の波長応答結果を 図 3(b) に示す。図より、円柱間距離 5 nm 時よりもピーク波長のシフト量が低減していることが確認できる。図 3(c) では、さらに円柱間距離を 2 倍にした $d=20\text{ nm}$ 時の波長応答結果を示す。図より、C2 と C7 のピーク波長が一致していることがわかる。これにより円柱間距離を離すことによりピーク波長のシフト量をほぼゼロにできることを示した。

4. まとめ

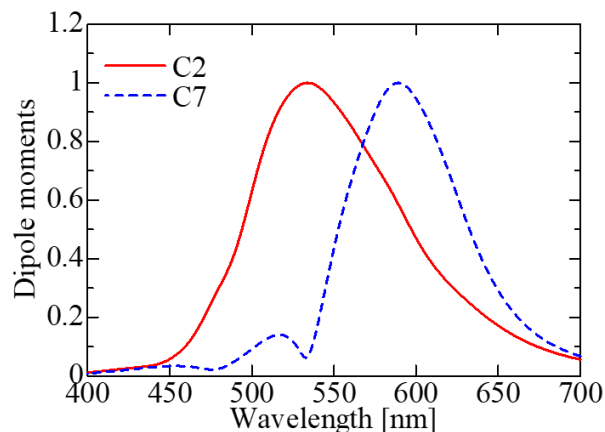
本報告では、微小金属柱列における局在表面プラズモンの波長応答について検討を行った。縦モードで励振した際、円柱直径に対して円柱間距離が短い場合では、ピーク波長は大きく長波長側にシフトし、円柱間距離を離すことによりピーク波長のシフト量は低減する。また、円柱直径に対して 2 倍の円柱間距離にすることによりピーク波長が一致することを明らかにした。

5. 謝辞

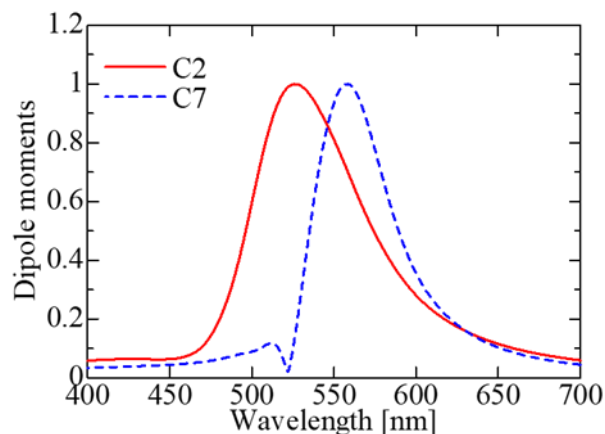
本研究の一部は、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

6. 参考文献

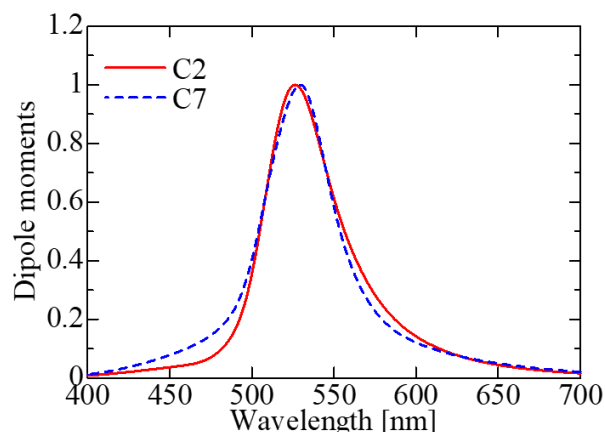
- [1] W. Nomura, M. Ohtsu, and T. Yatsui: "Nanodot coupler with a surface plasmon polariton condenser for optical far/nearfield conversion", Appl. Phys. Lett., Vol. 86, pp. 181108-1—181108-3, April, 2005.
- [2] T. Coenen, E. J. Vesseur, A. Polman, and A. F. Koenderink: "Directional emission from Plasmonic Yagi—Uda Antennas Probed by Angle-Resolved Cathodoluminescence Spectroscopy", Nano Lett. Vol. 11, pp.3779—3784
- [3] K. Nagasawa, T. Takeuchi, S. Ohnuki, IEICE Electronics Express. Vol. 13 (2016) No. 8 pp. 20160216
- [4] J. M. McMahon, S. K. Gray, and G. C. Schatz: "Calculating nonlocal optical properties of structures with arbitrary shape", Phys. Rev. B., Vol. 82, pp. 035423-1—035423-12, 2010.
- [5] 大貫進一郎, 遠藤源博, 高橋涼, 呉迪, 山口隆志: "微小金属柱列における光学応答解析: ピーク波長と断面形状", IEICE technical report, 2017-06-02
- [6] 遠藤源博, 高橋涼, 山口隆志, 大貫進一郎 "微小金属柱列における光学応答解析: 振動方向とピーク波長", 2017 IEICE ソサイエティ大会, C-15-13



(a) $d=5\text{ nm}$



(b) $d=10\text{ nm}$



(c) $d=20\text{ nm}$

図 3 円柱間距離に対するダイポールモーメントの波長特性