法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-06-02

円筒座標系を利用したプラズモニックブラックポールの解析

中込, 雄大 / NAKAGOMI, Yudai

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学・工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
(巻 / Volume)
55
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
2
(発行年 / Year)
2014-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00010487

円筒座標系を利用したプラズモニックブラックポールの解析

ANALYSIS OF A PLASMONIC BLACK-POLE USING THE CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM

中込 雄大
Yudai NAKAGOMI
指導教員　山内　潤治

法政大学大学院工学研究科情報電子工学専攻修士課程

Considerable interest has been directed towards a broadband omnidirectional light absorber, which is often called an optical black-hole. In this paper, we propose a structure composed of a series of touching spherical metal surfaces. We call this structure a plasmonic black-pole(PBP). The body-of-revolution finite-difference time-domain (BOR-FDTD) method with the periodic boundary condition is employed to investigate the absorption characteristics. As a result, the PBP provides the effective suppression of the reflected waves over a wavelength range of 600 to 900 nm.

Key Words *: Light absorber, Optical black-hole, Plasmonic black-pole(PBP), Body-of-revolution finite-difference time-domain (BOR-FDTD) method*

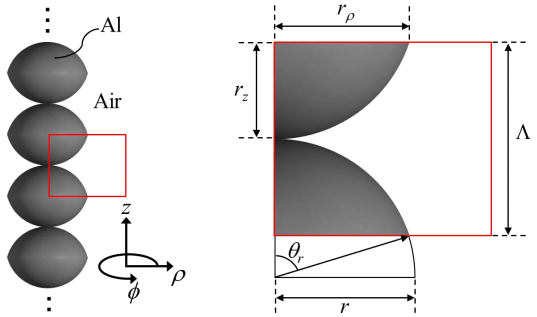
1. はじめに

近年，表面プラズモンを利用した技術は，プラズモニクスとして確立され多くの研究が進められている．プラズモニクスを代表する例として，あらゆる方向から到来する電磁波を吸収する素子が検討されている．電磁波吸収体においては，マイクロ波帯ではメタマテリアルによる実証が報告されているが [1],[2]，光波帯ではギャップ表面プラズモン (GSP) の利用が提案されている [3]．GSP とは，近接した 2 つの金属粒子間において，局所的に著しく電場が増強する現象である．GSP を利用した光波吸収体は，宇宙で存在が予想されているブラックホールとの類似性から，プラズモニックブラックホールとも呼ばれ注目されている．一方で，GSP による電場増強を実現させるには，偏波依存性を考慮しなければいけない．つまり，隣接する粒子の配列軸と同じ方向の偏波を入射させる必要がある．このことから，プラズモニックブラックホールでは，偏波依存性を生じるという問題はあるものの，アルミニウムなどの金属材料のみで形成できる利点があると言える．

これまで筆者らは，縦方向に周期性を取り入れた，無限に連なる柱状の素子を提案し，その特性を評価してきた [4]-[6]．柱状となることから，プラズモニックブラックポール (PBP) と名付けている．本稿では，3 次元構造 (ρ,ϕ,z) を等価的な 2 次元構造 (ρ,z) に置き換えることができる，回転対称構造用差分時間領域 (BOR-FDTD) 法 [7] を用いて PBP を解析する．反射率の波長特性を評価することにより，広帯域に渡って電磁波吸収体として機能することを示す．

2. 本論

構造の全体図を図 1 (a) に示す．それぞれの金属粒子は互いに接しており，z 方向に無限に連なっている．金属にはアルミニウムを使用し，Drude-Lorentz モデル [8] として扱う．また，周囲の媒質は空気とする．単一セルの ρ-z 断面図を図 1 (b) に示す．ρ 方向の径を $r_\rho = 500$ nm に固定する．半径 r の球を想定し，角度 θ_r 面で水平に切断することで，r_z が決定される．このとき，$\theta_r = 90°$ では完全な真球となる．一周期の長さを $\Lambda = 2r_z$ として，セルを構成する．解析に用いる刻み幅を $\Delta\rho = \Delta z = 1$ nm に選ぶ．入射波には，一様な振幅をもつ垂直偏波を用い，ρ 方向から励振する．



(a) 全体図　　(b) 単一セルの断面図

図 1　構造

本稿で提案する素子は，周期長と入射波長の関係から高次回折波が生じる．従って，高次回折波が反射特性に与える影響も踏まえて評価を行う．高次回折波が生じる波長は，以下

に示す一般的なグレーティング方程式より算出できる．

$$|k_{\mathrm{d}}| = |k_0| \sin\theta + m \left| \frac{2\pi}{\Lambda} \right| \tag{1}$$

このとき，m は回折次数であり，$m = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$ となる．また，θ は入射角度となるが，本稿では垂直入射を取り扱うため $\theta = 0^\circ$ となる．式 (1) より，1 次回折波の生じる波長は一周期の長さと等しくなることがわかる．

図 2 に，θ_r を可変としたときの反射率の波長特性を示す．まず，回折波による影響に注目する．上述したように，本構造では高次回折波が生じるため，観測された反射波は 0 次及び 1 次回折波を足し合わせた結果となる．$\theta_r = 90^\circ$ では，一周期の長さが r_z の 2 倍，つまり 1000 nm となるため，帯域のほとんどで 1 次回折波が生じている．同様に $\theta_r = 60^\circ$ の場合，一周期の長さは 578 nm となることから，1 次回折波の生じる波長も 578 nm と算出できる．波長特性の結果を見ると，λ =578 nm 近傍より短波長側で 1 次回折波による変動が見られることから，この結果は理論的にも矛盾しないと言える．

次に，反射率の増減について説明する．$\theta_r = 90^\circ$ では，セル端での接線が入射偏波と同一方向となるため，反射が比較的大きくなる．他方，θ_r を小さくすることで，ギャップ部に光波が滑らかに入射し，十分に減衰を受ける．特に $\theta_r = 60^\circ$ では，波長 600 から 900 nm の広帯域で反射率が 0.2 以下に維持されている．

図 3(a), (b) に，$\lambda = 655$ nm における，$\theta_r = 90^\circ, 60^\circ$ の場合のパワー密度分布をそれぞれ示す．$\rho = 600$ nm の位置から，z 軸に向かって一方向に一様な波が励振されている．ゆえに，$\rho = 600$ nm 以上は反射界領域となる．結果より，どちらも GSP によりギャップ付近でパワーが局在している様子を観察できる．一般に，局所的に著しい電場増強が起こる場所はホットサイトと呼ばれる．図の観測結果は，理論的に予測されているホットサイトの特徴 [9] を，よく表現している．$\theta_r = 90^\circ$ では，反射界領域において回折波が存在することがわかる．これは 1 次回折波による干渉だと言える．一方で $\theta_r = 30^\circ$ では，光波が滑らかに入射されるため，反射される界は極めて小さくなる．結果として，光波が吸収される様子を見出せる．

3. むすび

周期境界条件を適用した BOR-FDTD 法を用いてプラズモニックブラックポールを解析し，その特性を評価した．まず，反射率の波長特性を示し，θ_r を小さくすることで広帯域に渡り電磁波を吸収できることを示した．特に $\theta_r = 60^\circ$ の場合，波長 600 から 900 nm の帯域で反射率が 0.2 以下に維持できることを明らかにした．次に，光ブラックホールとしての機能をパワー密度分布により観察した．構造を切断することで，光波が滑らかに入射され，反射波が極めて小さくなることを見出した．

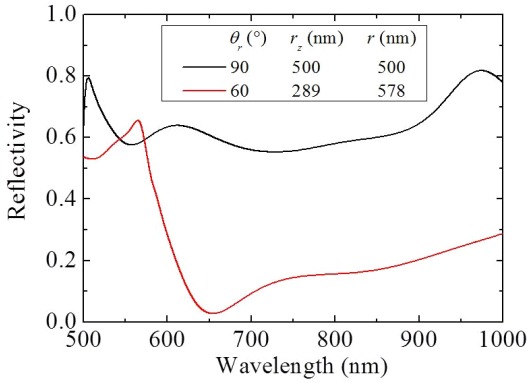
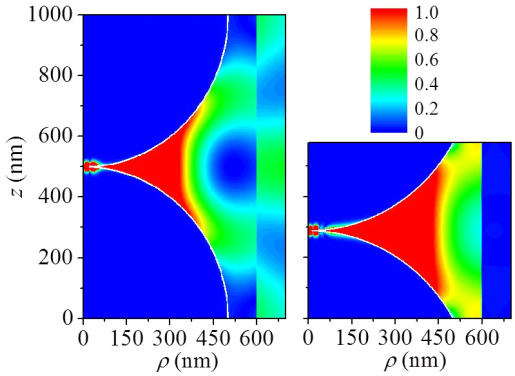


図 2　反射率の波長特性



(a) $\theta_r = 90^\circ$　　(b) $\theta_r = 60^\circ$

図 3　パワー密度分布 ($\lambda = 655$ nm)

参考文献

1) E. E. Narimanov and A. V. Kildishev, “Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, 041106, 2009.

2) Q. Gheng, T. J. Cui, W. Xiang, and B. G. Cai, “An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials,” *New J. Phys.*, vol. 12, 063006, 2010.

3) K. V. Nerkararyan, S. K. Nerkararyan, and S.I. Bonzhevolnyi, “Plasmonic black-hole: Broadband omnidirectional absorber of gap surface plasmons,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 22, pp. 4311-4313, Nov. 2011.

4) 山内 潤治, 中込 雄大, 中野 久松, “周期構造を利用したプラズモニックブラックポールの提案,” 2013 年電子情報通信学会総合大会, C-3-12.

5) J. Yamauchi, Y. Nakagomi, and H. Nakano, “Plasmonic pole-absorber using a periodic structure,” *APCAP,* Chiang Mai, T1A2, 2013.

6) 山内 潤治, 中込 雄大, 中野 久松, “傾斜入射時における周期構造を利用したプラズモニックブラックポールの解析,” 2013 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-69.

7) D. B. Davidson and R. W. Ziolkowski, “Body-of-revolution finite-difference time-domain modeling of space-time focusing by a three-dimensional lens,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 4, pp. 1471-1490, 1994.

8) A. Vial, “Implementation of the critical points model in the recursive convolution method for modelling dispersive media with the finite-difference time domain method,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 9, pp. 745-748, 2007.

9) H. Xu, J. Aizpurua, M. Käll, and P. Apell, “Electromagnetic contributions to single-molecule sensitivity in surface-enhanced Raman scattering,” *Phys. Rev. E*, vol. 62, no. 3, pp. 4318-4324, Sep. 2000.