

金属パッチを装荷した偏波無依存ブラックシート

ITO, Hiroshi / 伊東, 浩志

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(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

(巻 / Volume)

60

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

2

(発行年 / Year)

2019-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022009>

金属パッチを装荷した偏波無依存ブラックシート

NEARLY POLARIZATION-INDEPENDENT BLACK SHEET LOADED WITH A METAL PATCH

伊東 浩志

Hiroshi ITO

指導教員 山内 潤治

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

A black sheet composed of metal-dielectric (MD) multilayer stacks is analyzed by finite-difference time-domain (FDTD) method. Combination of Fe and SiO₂ is adopted for the study. It is found that the addition of a square patch on top of the dielectric layer contributes to broadening the absorption characteristics.

Key Words : Solar energy, Absorber, Surface plasmons

1. まえがき

局在表面プラズモン (LSP) を利用した研究が盛んにされており、その一つとして、電磁波を吸収する素子が検討されている。マイクロ波帯ではメタマテリアルの使用により実証されている [1]。他方、光波帯では金属と誘電体の交互層 (MD) で構成される平面吸収体が提案されている [2],[3]。この光吸収体は従来に比べて簡素な構造であり、センシングや太陽電池、放射冷却 [4]-[6] といった広範囲の領域で関心が高まっている。本稿では、正方形金属パッチを装荷したブラックシートを検討する [7],[8]。パッチ幅に対する吸収特性を調査する。界分布より、LSP モードによって短波長帯における吸収率が改善され、広帯域に渡って高い吸収率を維持することを示す。また、傾斜入射時でさえも広帯域特性を維持できることを見出す。結果として、偏波にほとんど無依存のブラックシートが実現可能であることを明らかにする。

2. 本論

図 1 に解析する周期構造のユニットセルを示す。金属には Fe を使用し、0.7 μm での屈折率 [9] を用いて Drude 分散性媒質として扱う。本稿では、TE, TM 両偏波での動作を意図し、空気層との界面にある金属膜を正方形パッチにする。金属膜の厚さを $t_p = 95 \text{ nm}$ 、パッチ幅を w_p とする。誘電体層で挟まれた金属膜の厚さを $t_m = 10 \text{ nm}$ に設定する。予備的な計算によると、金属パッチを付加する場合には t_{s2} を小さくする必要が生じた。そこで、誘電体の厚みを $t_{s1} = 145 \text{ nm}$ 、 $t_{s2} = 50 \text{ nm}$ に設定する。構造下部の金属の厚さは半無限とする。金属間の媒質は SiO₂ ($n_s = 1.45$) とする。本構造は x, y 方向を無限周期としている ($\Lambda = 300 \text{ nm}$)。構造上部の空気層より、一様な振幅をもつ直線偏波を入射し、反射波

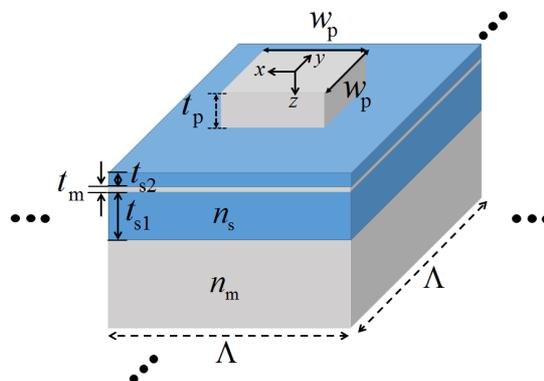


図 1 正方形金属パッチを装荷したブラックシート

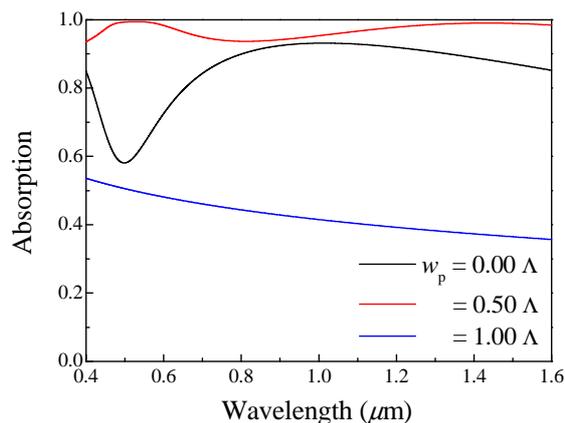
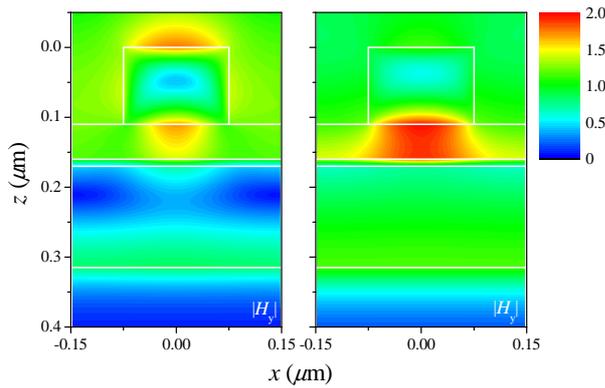


図 2 金属パッチ幅を可変とした際の吸収特性

を観測する。解析には周期境界条件を適用した FDTD 法を使用する。

パッチ幅を可変とした際の吸収特性について議論する。図 2 に吸収率の波長特性を示す。比較として、構造上部にパッチがない場合とフラットな金属の場合の特性をそれぞれ黒、青線で併記する。パッチ設置前の平面



(a) $\lambda = 0.7 \mu\text{m}$ (b) $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$

図3 垂直入射時における H_y 成分の界分布

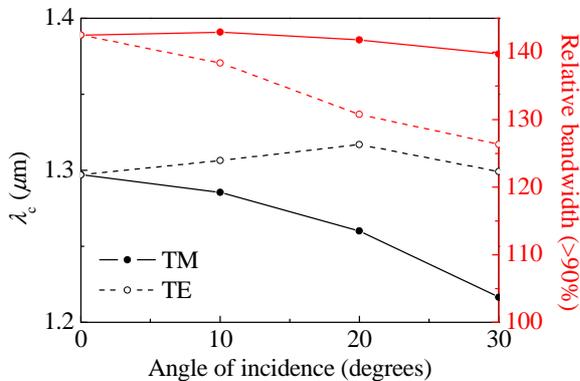


図4 入射角に対する動作中心波長および比帯域特性

構造でも、 $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ 付近では 90%に近い吸収率が得られる。金属パッチの装荷は、可視光帯での吸収率の悪化を解消し、吸収率の広帯域化に貢献する。図より、 $w_p = 0.5 \Lambda$ にすることで、 $\lambda = 0.4$ から $2.0 \mu\text{m}$ の広帯域に渡って 94%以上の吸収率を維持していることがわかる。この w_p は 2次元モデルで得られた構造値 [7] (0.33Λ) に比べて大きくなっている。

$\lambda = 0.7, 1.6 \mu\text{m}$ における H_y 成分の界分布を図3に示す。図より、 $\lambda = 0.7 \mu\text{m}$ では金属パッチの近傍で LSP モードが励起されていることがわかる。一方 $\lambda = 1.6 \mu\text{m}$ では、金属パッチ部における LSP と誘電体下部層での界とのハイブリッドモードの励起されている様子が観察される。

図4に入射角に対する、動作中心波長および 90%以上の吸収率の得られる比帯域特性を示す。図より、TE, TM 両偏波ともに、 $\theta = 30^\circ$ の場合でも 125%以上の比帯域 (90%以上の吸収率) を維持している。可視光全域で動作させることを想定すると、 $0.4 \mu\text{m}$ から $0.8 \mu\text{m}$ で必要な比帯域は 67%となり、検討のモデルは十分に要求を満たしている。以上より、偏波にほとんど無依存の広帯域なブラックシートが実現できたといえる。

3. まとめ

MDMD 構造に正方形金属パッチを装荷したブラックシートを取り上げ、パッチ幅 w_p に対する吸収特性を調査した。 $w_p = 0.5 \Lambda$ にすることで、 $\lambda = 0.4$ から $2.0 \mu\text{m}$ の広帯域に渡って 94%以上の吸収率を維持することを示した。この w_p の値は、2次元モデルで予想されていた値よりも大きいことを明らかにした。界分布より、LSP モードによって広帯域に渡って高い吸収率を維持することを示した。加えて、傾斜入射時においても広帯域特性を維持できることを見出した。TE, TM 両偏波ともに、 $\theta = 30^\circ$ の場合でも 125%以上の比帯域 (90%以上の吸収率) を維持することを明示した。以上より、偏波にほとんど無依存のブラックシートが実現可能であることを明らかにした。なお、類似の特性は Al_2O_3 と Ti との交互層でも実現できることを付記する [10]。

参考文献

- 1) Q. Cheng, T. J. Cui, W. X. Jiang, and B. G. Gai, "An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials," *New J. Phys.*, vol. 12, 063006, 2010.
- 2) Lee, B. J. and Zhang, Z. M., "Design and fabrication of planar multilayer structures with coherent thermal emission characteristics," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, pp. 063529-1-063529-10, 2006.
- 3) Cui, Y., He, Y., Jin, Y., Ding, F., Yang, L., Ye, Y., Zhong, S., Lin, Y., and He, S., "Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers," *Laser Photon. Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 495-520, 2014.
- 4) Wu, D., Liu, C., Liu, Y., Yu, L., Yu, Z., Chen, L., Ma, R., and Ye, H., "Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 3, pp. 450-453, Aug. 2017.
- 5) Dereshgi, S. A., Ghobadi, A., Hajian, H., Butun, B., and Ozbay, E., "Ultra-broadband, lithography-free, and large-scale compatible perfect absorbers: the optimum choice of metal layers in metal-insulator multilayer stacks," *Sci. Rep.*, vol. 7, 14872, pp. 1-8, Nov. 2017.
- 6) 山内 潤治, 高橋 直希, 伊東 浩志, 中野 久松, "可視光帯で動作する平面吸収体の偏光フィルタへの適用," 信学総大, C-3-33, 2018.
- 7) Yamauchi, J., Takahashi, N., Ito, H., and Nakano, H., "Polarization-dependent and -independent absorbers with a periodic metal grating," *Int. Workshop on Opt. Wave Theory and Numerical Modelling*, P-07, Apr. 2018.
- 8) 山内 潤治, 伊東 浩志, 中野 久松, "正方形金属パッチを利用したブラックシート," 信学総大, C-3-34, 2018.
- 9) Johnson, P. B. and Christy, R. W., "Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd," *Phys. Rev. B*, vol. 9, no. 12, pp. 5056-5070, Jul. 1974.
- 10) Yamauchi, J., Ito, H., Takahashi, N., and Nakano, H., "Nearly polarization-independent absorber consisting of metal-insulator multilayer stacks loaded with a metal patch," *Proc. of SPIE*, P-10913-46, Feb. 2019.