

金属円盤型THz表面波分割器のFDTD解析におけるパワー評価

楠, 大輝 / Kusunoki, Daiki

(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)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

3

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014170>

金属円盤型 THz 表面波分割器の FDTD 解析におけるパワー評価

POWER EVALUATION OF A METAL DISC-TYPE SPLITTER FOR TERAHERTZ SURFACE WAVES
USING THE FDTD METHOD

楠 大輝

Daiki KUSUNOKI

指導教員 柴山 純

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

Terahertz (THz) surface wave splitters based on spoof surface plasmon polaritons (SPP) in metal grating structures are analyzed using the finite-difference time-domain (FDTD) method. We investigate a three-dimensional disc-type splitter at separate frequencies of 1.0 and 1.5 THz. The power propagating in each direction is evaluated using the Poynting vector.

Key Words : Finite-difference time-domain (FDTD) method, Spoof surface plasmon polaritons (spoof SPP), Terahertz (THz) wave, frequency splitter

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 帯では金属にグレーティング構造を設けると、擬似的な表面プラズモンポラリトン (SPP) が伝搬する [1]。この擬似 SPP の伝搬特性を利用した、金属グレーティングからなる 2 方向周波数分割器が 2 次元 FDTD 法で解析されている [2], [3]。また、現実的なデバイスとして、有限幅の金属グレーティングを用いた多方向周波数分割器が、理論計算に加え実験的にも検討されている [4], [5]。ただし、多方向周波数分割器では、電磁波の結合が狭いグレーティング領域に限られる欠点がある。そこで筆者らは、金属円盤上にグレーティングを扇状に配置した、広い結合領域を有する周波数分割器を提案し、2 ~ 4 種類の周波数分割が可能であることを議論した [6] (導波原理や応用に関しては文献 [7] を参照のこと)。しかしながら、文献 [6] では周波数分割の振る舞いのみを示しており、各方向に伝搬する詳細なパワー評価は行っていない。

本論文では、金属円盤型 THz 表面波分割器の各方向へ進む電磁界のパワーをポインティングベクトルに基づいて算出し、その動作特性を定量的に評価する [8]-[10]。3 次元円筒座標系 FDTD 法を用いて、2 種類の周波数を分割するデバイスを解析する。左右のグレーティングに結合するパワーが極めて小さく、多くのパワーを分割し取り出すためには工夫が必要であることを指摘する。

2. 本論

図 1 に解析する 2 周波数分割器の構造を示す。金属は完全導体 [11] として扱う。左側から 1.5 THz を、右側から 1.0 THz を取り出すため、それぞれのグレーティングの深さを $h_L = 30 \mu\text{m}$ 、 $h_R = 50 \mu\text{m}$ に選択する。

グレーティング部の開き角を $\phi_L = \phi_R = 135^\circ$ 、金属部の開き角を $\phi_M = 45^\circ$ とする。その他のパラメータを $r = 80 \mu\text{m}$ 、 $p = 50 \mu\text{m}$ 、 $w = 20 \mu\text{m}$ 、 $d_{\text{out}} = 200 \mu\text{m}$ 、 $d_{\text{in}} = 480 \mu\text{m}$ 、 $l = 400 \mu\text{m}$ に選ぶ。

径偏光固有モードを幅 d_{in} の入力部から +z 方向に入射し、各方向に伝搬するパワーを評価する。円盤上部への放射パワー P_{rad} と下部への反射パワー P_{ref} を

$$P_{\text{rad,ref}} = \frac{1}{2} \iint \text{Re} (E_\rho H_\phi^* - E_\phi H_\rho^*) ds \quad (1)$$

で計算する。その際、 P_{rad} の積分は金属表面から $100 \mu\text{m}$ 上部の ρ - ϕ 面で行い、半径 $\rho = 600 \mu\text{m}$ を積分範囲としている。また、 P_{ref} の積分計算は入射平面から $75 \mu\text{m}$ 下部の円筒内の ρ - ϕ 面 (半径 $\rho = d_{\text{in}}/2$) で行っている。

左右のグレーティングに沿って伝搬するパワー $P_{\text{left,right}}$ は

$$P_{\text{left,right}} = \frac{1}{2} \iint \text{Re} (E_z H_\phi^* - E_\phi H_z^*) ds \quad (2)$$

で計算する。その際、半径 $\rho = 600 \mu\text{m}$ での z - ϕ 面を積分するが、 z の積分範囲は金属表面から P_{rad} を計算した $100 \mu\text{m}$ までとする。 $P_{\text{left,right}}$ はそれぞれ、 z - ϕ 面の左側 180 度、右側 180 度の積分値である。

図 2 に金属円盤表面上の H_ϕ 成分を示す。図より、1.0 THz の表面波は右側、1.5 THz は左側のグレーティングに強く結合し、周波数分割器として機能していることが分かる。また、1.0 THz は左側のグレーティングにも界成分が導波している。これは 1.0 THz は $h_L = 30 \mu\text{m}$ に対しても分散関係を満たすためである [6]。

各方向へ伝搬するパワーを式 (1), (2) で評価する。まず、1.0 THz でのパワーを考察する。結果として、

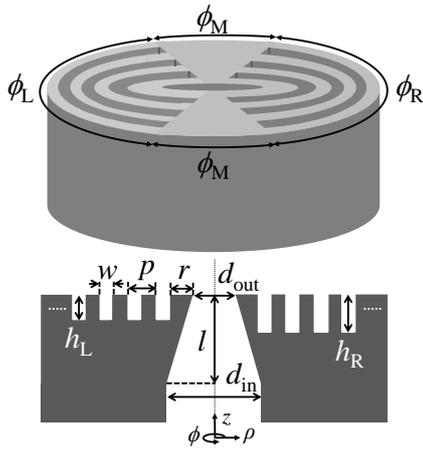


図1 金属円盤型周波数分割器の構造

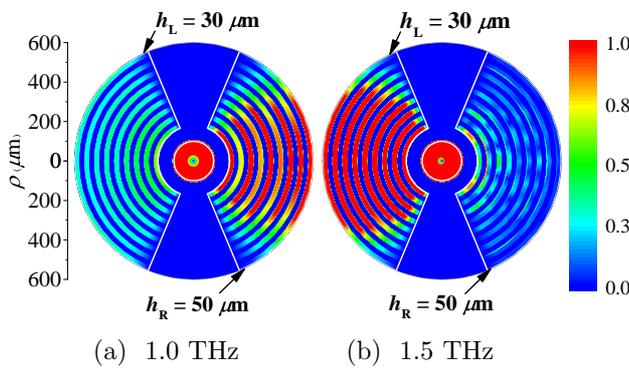
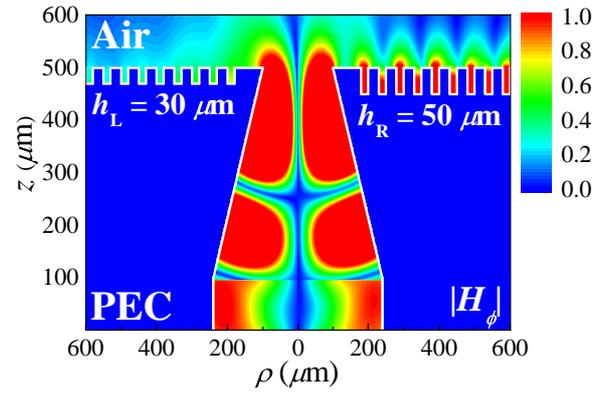


図2 金属円盤表面上の H_ϕ 成分

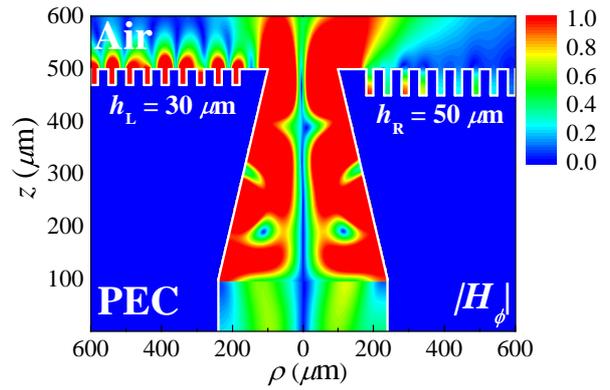
7%が円盤上部へ放射，85%が反射しており，左側へは3%，右側へは5%のパワーが進行している．図3(a)は ρ - z 断面の H_ϕ 成分を示している．入力部においてテーパ構造が始まる直前で径偏光固有モードを $+z$ 方向に励振しているため， $z > 100 \mu\text{m}$ の領域では反射界成分のみが観察できる．パワー評価から分かる通り，多くのパワーが反射している．これは，1.0 THz の径偏光モードが $d_{\text{out}} = 200 \mu\text{m}$ ではカットオフの条件となるためである．カットオフによるテーパ上部での反射により，入力部に定在波の生じる様子が観察できる．また，前述したとおり，左側のグレーティングへも表面波が結合している．

次に，1.5 THz でのパワーを議論する．この場合，68%が放射，23%が反射しており，左側へは8%，右側へは1%のパワーが進行している．1.5 THz では右側のグレーティングに対して分散関係を満たさないため境界は結合せず，多くの界成分が上部に放射していることが図3(b) から分かる．

以上のように，本デバイスではグレーティングに結合するパワーの総量が小さい．したがって，結合量を増加させるために何らかの工夫が必要である．例えば，円筒ワイヤーを中心に挿入する [4] など入力部の構造最適化 [12] や，円盤上部にカバーディスクを設け，放



(a) 1.0 THz



(b) 1.5 THz

図3 ρ - z 断面の H_ϕ 成分

射パワーをグレーティングに結合させるなどの方法が考えられる．

3. 結び

金属円盤型 THz 表面波分割器の各方向へ進む電磁界のパワーを定量的に評価した．また，構造断面内の界分布を示し，周波数分割の様子を考察した．本デバイスは周波数分割器として動作するものの，グレーティングに結合するパワーが極めて小さいことが分かった．結合パワーを増加させるための構造最適化は今後の課題とする．

参考文献

- 1) J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, "Mimicking surface plasmons with structured surfaces," *Science*, vol. 305, no. 5685, pp. 847-848, Aug. 2004.
- 2) Q. Gan, Z. Fu, Y. J. Ding, and F. J. Bartoli, "Bidirectional subwavelength slit splitter for THz surface plasmons," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 26, pp. 18050-18055, Dec. 2007.
- 3) 藤田 和広, 小田島 渉, "金属グレーティング構造におけるテラヘルツ疑似表面プラズモンの FDTD シミュレーション," 信学技報, EST2013-5, May 2013.
- 4) Y. J. Zhou, Q. Jiang, and T. J. Cui, "Bidirectional

- surface wave splitters excited by a cylindrical wire,” *Opt. Exp.*, vol. 19, no. 6, pp. 5260-5267, March 2011.
- 5) Y. J. Zhou and T. J. Cui, “Multidirectional surface-wave splitters,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 22, pp. 221901-1-3, May 2011.
 - 6) J. Shibayama, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Metal disc-type splitter with radially placed gratings for terahertz surface waves,” *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 4, pp. 352-353, Feb. 2015.
 - 7) D. Davies, “Inside view: Surface plasmon polariton propagation properties can be used to split terahertz surface waves in multiple directions with metal disc-shaped devices,” *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 4, p. 302, Feb. 2015.
 - 8) 柴山 純, 楠 大輝, 山内 潤治, 中野 久松, 信学総大, C-15-2, 2015.
 - 9) 柴山 純, 楠 大輝, 山内 潤治, 中野 久松, 信学論 (C), vol. J99-C, no. 5, pp. 247-249, 2016.
 - 10) J. Shibayama, D. Kusunoki, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Power evaluation of a metal disc-shaped terahertz surface wave splitter,” *Prog. Electromag. Res. Symp.*, p. 474, July 2015.
 - 11) J. Shibayama, Y. Uchizono, S. Ozaki, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Treatment of metal for the FDTD analysis of terahertz devices,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 46, no. 2, pp. 345-356, Feb. 2014.
 - 12) J. Shibayama, D. Kusunoki, J. Yamauchi, and H. Nakano, “Analysis of a metal disc-shaped terahertz surface wave splitter with a center rod,” *APWC*, pp. 93-94, Sep. 2016.