

# メタルスリットアレイ積層構造への誘電体挿入効果

徳田安紀<sup>1)</sup>, 坂口浩一郎<sup>1)</sup>, 渡辺将伍<sup>1)</sup>, 加藤康作<sup>2)</sup>, 中嶋誠<sup>2)</sup>

- 1) 岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科
- 2) 大阪大学 レーザー科学研究所

## 1. はじめに

金属板に周期的に溝を切ったメタルスリットアレイは、スリット端での回折限界周波数以下で擬似的な誘電体として働き、その等価屈折率はスリット周期とスリット幅の比で決まり、原理的には1から $\infty$ の全ての屈折率範囲で変えられる[1].

我々は、このメタルスリットアレイの多段構造の光学的性質を調べ[2-5], それらを利用してテラヘルツ波を制御することを検討している[6-8]. 本研究では、メタルスリットアレイの二段構造に誘電体を挿入したとき、透過特性がどのように変わるかについてテラヘルツ時間領域分光法 (THz Time-Domain Spectroscopy: THz-TDS) による測定を行い、結果を時間領域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain: FDTD) に基づいたシミュレーションにより解釈した[9].

## 2. スリットアレイの構造と透過スペクトルの測定

図1に検討した二段型のメタルスリットアレイ構造の断面図を示す. 上下のスリットアレイの構造は同じで、スリットの高さを  $h$ , 周期を  $d$ , 幅を  $w$  とし、上下のアレイの間隔を  $s$  とした. 実験では真鍮板をワイヤ放電加工して作製した  $h = 1000 \mu\text{m}$ ,  $d = 500 \mu\text{m}$ ,  $w = 150 \mu\text{m}$  のスリットアレイを用いた[8].

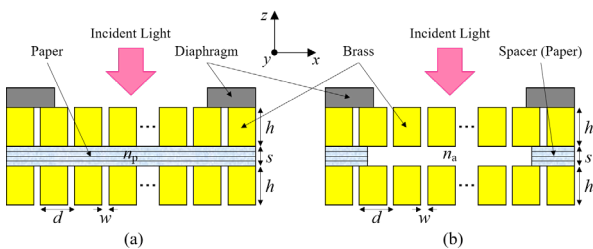


図1 実験系の断面図. 中間層は(a)コピー紙 (屈折率  $n_p = 1.4$ ) と(b)エアギャップ (屈折率  $n_a = 1.0$ ).

図1(a)のように上下のアレイ間に横ずれが無い状態で、屈折率  $n_p$  が1.4で1枚の厚さが約  $100 \mu\text{m}$  のコピー用紙を複数枚挿入した構造に対して、TM波 (磁場成分が  $y$  方向) を垂直に ( $z$  方向に沿って) 入射させた場合の透過スペクトルを THz-TDS 法を用いて測定した. 比較のために、図1(b)のように同じ枚数のコピー用紙をスペーサとして用いて、エアギャップに対するスペクトルも測定した.

## 3. 結果と考察

### 3-1 透過スペクトルの測定結果

図2(a)の赤の実線は、10枚までの挿入枚数  $N$  に対する透過スペクトルを示す. また、黒の点線は対応したエアギャップに対する透過スペクトルを示す. なお、ゼロギャップ ( $N=0$ ) に対する黒の実線は  $h = 2000 \mu\text{m}$  の単体試料に対する透過スペクトルである. また、図2(b)と2(c)は、それぞれ、横軸に挿入枚数  $N$  をとったコピー用紙とエアギャップに対するスペクトルマップである. ここで、各モードは  $h = 2000 \mu\text{m}$  のスリットアレイに対するモード次数  $m$  ( $= 0, 1, 2, \dots$ ) を用いて  $D_m$  で表した.

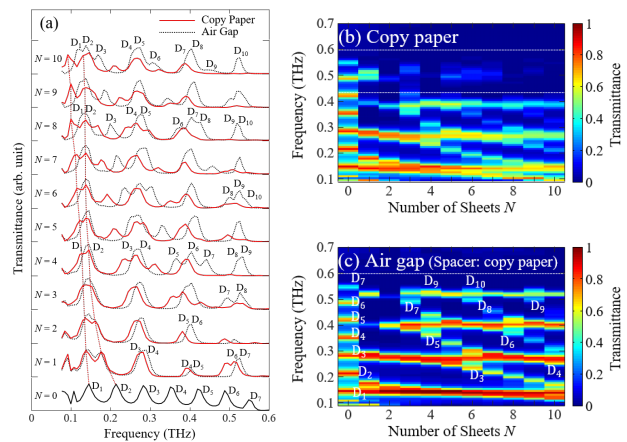


図2 透過スペクトルの測定結果. (a)挿入枚数  $N$  に対する透過スペクトル. (b)コピー用紙挿入に対するスペクトルマップと(c)エアギャップに対するスペクトルマップ.

どちらの場合も、 $cd$  ( $c$  は光の速さ) で決まる回折限界周波数  $f_{RW}$  の  $0.6 \text{ THz}$  以下、すなわちメタマテリアル条件下 ( $\lambda > d$ ) で強い Fabry-Perot 的な共鳴モードが観測された[5]. しかし、図2(b)のコピー用紙を挟んだ構造では  $0.45 \text{ THz}$  以上のモードは強く減衰していることが分かる.

### 3-2 FDTD シミュレーションによる解釈

実験結果を理解するために、等価な構造に対してアレイ間距離  $s$  を0から  $1000 \mu\text{m}$  まで  $2 \mu\text{m}$  刻みで変化させたときの透過スペクトルを FDTD シミュレーションを用いて計算した. 図3(a)はメタルスリット部以外は全て空気 ( $n_a = 1.0$ ) の場合、図3(b)はコピー用紙の挿入実験に対応するスリット間のみが誘

電体 ( $n_p = 1.4$ ) である場合、そして図 3(c)はメタルスリット部以外は全て誘電体 ( $n_p = 1.4$ ) である場合のスペクトルマップである。

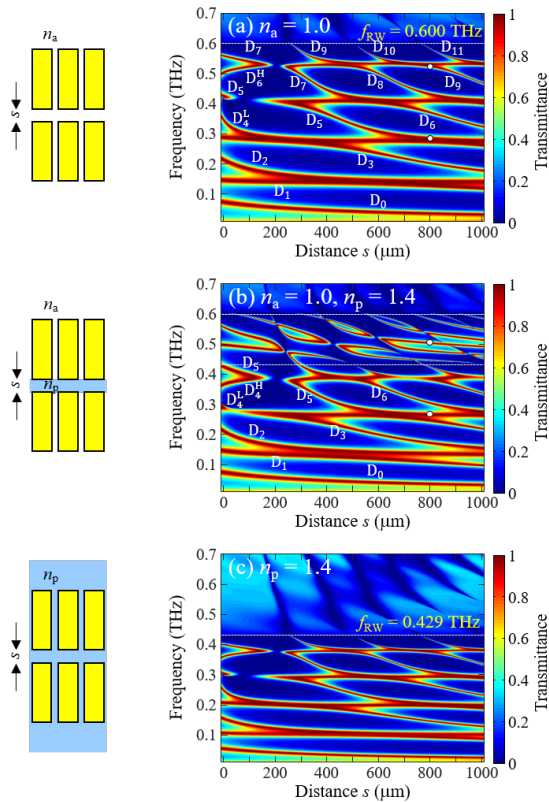


図 3 スリット間距離  $s$  に対する透過スペクトルマップの FDTD 計算結果. (a)  $n_a = 1.0$ , (b)  $n_a = 1.0, n_p = 1.4$ , (c)  $n_p = 1.4$ .

エアギャップに対する図 3(a)の計算結果は、モード消失の位置も含めて図 2(c)の実験結果と基本的によく合っている。ここで、 $s = 100$  と  $200 \mu\text{m}$  付近のモード消失は、それぞれ、 $D_5$ モードとブルーシフトした  $D_4$ モード。および  $D_7$ モードとブルーシフトした  $D_6$ モードとの干渉によることが分かっている[3,5]。一方、図 3(c)の場合の回折限界周波数は  $c/n_p d$  になるので、図 3(a)を  $0.600 \text{ THz}$  から  $0.429 \text{ THz}$  に圧縮した特性になっていることが分かる。

ここで、コピー用紙の挿入に対応した図 3(b)の計算結果を見ると、 $0.43$  と  $0.60 \text{ THz}$  の間でのモードの振舞いはループ状の特性[4]を示すなど非常に複雑になっている。これは、内側のスリット端での回折限界周波数が  $0.429 \text{ THz}$  に下がったことによると考えられる。すなわち、 $0.429 \text{ THz}$  以下ではどちらのスリット端でも回折は生じないので通常の共鳴特性が観測されるが、 $0.429$  と  $0.60 \text{ THz}$  の間では内側のスリット端で回折が生じるため、アレイ間領域では回折波が干渉し、複雑な透過特性を示すと考えられる。

この現象を視覚的に確かめるために、FDTD シミュレーションにより磁場  $H_y$  の振幅分布を計算した。図 4 は図 3(a)と 3(b)において白丸でマークした  $s = 800 \mu\text{m}$  の 4 点における振幅分布を示す。

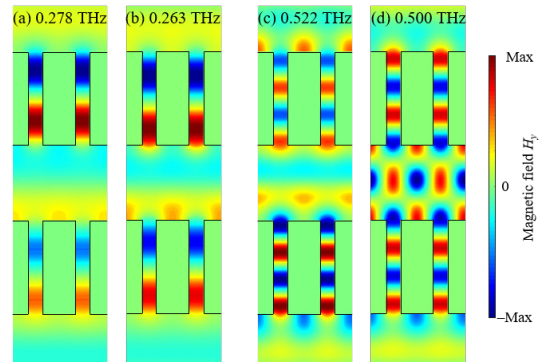


図 4 中間層 ( $s = 800 \mu\text{m}$ ) の屈折率が(a)(c) 1.0 と(b)(d) 1.4 の場合の共鳴モードの磁場の振幅分布

低次のモードに対しては、空気層 (図 4(a)) でもコピー用紙 (図 4(b)) でも、ほぼ同じ分布パターンを示している。これは共鳴周波数がともに  $0.429 \text{ THz}$  より十分低いため回折が生じていないためである。しかし、共鳴周波数が  $0.429 \text{ THz}$  以上の高次のモードに対しては、中間層が空気層 (図 4(c)) とコピー用紙 (図 4(d)) との場合で明らかに分布パターンは異なっている。これは図 4(d)の中間層では 1 次の回折波による干渉が生じているためである[9]。

なお、図 2(b)の実験結果で  $0.45 \text{ THz}$  以上のモードは強く減衰しているのは、実験試料の構造ばらつきにより回折条件が乱れているためと考えられる。

#### 4. まとめ

THz 帯で擬似的な誘電体とみなせるメタルスリットで誘電体を挟んだ構造の透過スペクトルを THz-TDS 法を用いて測定した。結果は FDTD シミュレーションにより解釈された。

#### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16K04982 助成を受けて行った。

#### 【参考文献】

- [1] J. T. Shen, P. B. Catrysse, and S. Fan, Phys. Rev. Lett., **94**, 197401 (2005).
- [2] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, J. Appl. Phys. **115**, 243104 (2014).
- [3] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, Y. Yamaguchi, and T. Fukushima, Appl. Phys. Express, **9**, 032201 (2016).
- [4] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, Y. Yamaguchi, and K. Takano, AIP Advances **7**, 035209 (2017).
- [5] Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, and K. Akiyama, J. Appl. Phys. **123**, 183102 (2018).
- [6] Y. Tokuda, H. Takaiwa, K. Sakaguchi, Y. Yakiyama, K. Takano, K. Akiyama, T. Fukushima, and M. Hangyo, Appl. Phys. Express, **5**, 042502 (2012).
- [7] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, T. Nishihara, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, Appl. Phys. Express, **6**, 062602 (2013).
- [8] Y. Tokuda, K. Takano, Y. Yamaguchi, K. Sakaguchi, and M. Nakajima, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 030306 (2017).
- [9] Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, and K. Akiyama, AIP Advances **8**, 095305 (2018).