

金属メタマテリアル(金属開口アレイ)と応用

信州大学理学部物理科学科 宮丸文章

金属板に周期的に開口をあけた物質(金属開口アレイ)が、興味深い光学特性を示すことで注目されている^{(1), (2)}. このような物質で最も身近なものは、電子レンジの窓に使われているものであろう. 金属の開口の直径より十分大きな波長の電磁波は開口を透過することができないので、電子レンジ内部のマイクロ波は外部に漏れることはない. 一方、可視光は金属開口を通ることができるので、外から中の食べ物を見ることができる. つまり電子レンジでは金属開口アレイをハイパスフィルターとして使用している. しかし、同様の金属開口アレイにおいて、開口アレイの周期と同程度の波長領域になると、非常にユニークな光学特性を示す. 最近の研究によりその光学特性は、金属表面に励起される表面プラズモンポラリトン(SPP)が密接に関わっていることがわかってきている. 本稿では、テラヘルツ領域における金属開口アレイの光学特性とその応用に関する我々の研究成果を紹介する.

図1(a)に我々の実験で用いた金属開口アレイの写真を示す⁽³⁾. 開孔の周期は1.13mm, 開口径は0.68mmであり、これはテラヘルツ波の波長のオーダーである. 図1(b)にこの開口アレイの透過スペクトルを示す. 0.3THz付近に透過ピークが観測され、比較的シャープなバンドパス特性を示している. またピーク透過率は90%程度であるが、これは開口率(金属開口アレイ全面積に対する開口面積の割合)が約33%であることを考えると、開口率の2.75倍程度大きい値となっており一見奇妙な現象である. この現象の理由は後に述べる. 金属開口アレイで観測されるピーク周波数は、おおむね開口の周期によって決定される. 図1(c)を見ると、開口の周期によってピーク周波数が異なっているのがわかる. つまり、開口周期によってピーク周波数のチューニングを行うこ

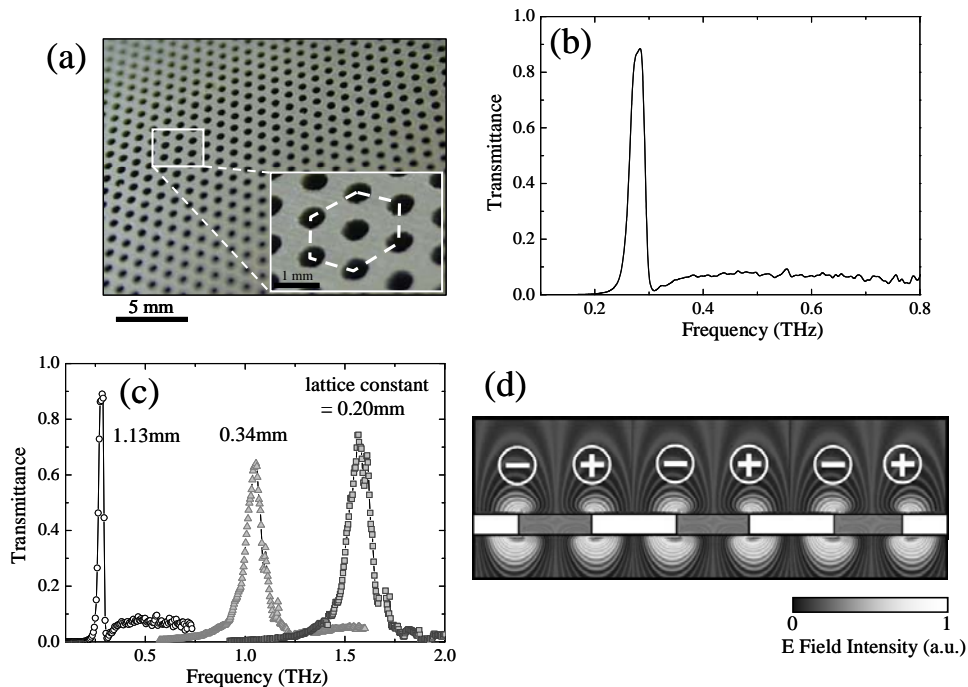


図 1 (a) 金属開口アレイ (b) 金属開口アレイの透過スペクトル (c) ピーク周波数の開口間隔依存性 (d) 金属開口アレイ表面付近の電場強度分布シミュレーション

とができる。さらに開口径や板厚の変化によってピーク周波数や線幅が変化するので、これらのパラメータによっても金属開口アレイの光学特性のチューニングを行うことが可能である。さてテラヘルツ波のインプットとアウトプットだけを見ると単にバンドパス特性であり、それほど興味をそそられるものではないが、この現象内部のメカニズムは、金属表面に励起される SPP と密接に関係しており、それ故、物理的及び応用的な面の両方において興味深いものとなる。SPP は、金属表面において金属内のプラズモンと金属外の電磁波とが結合した状態である。一般に、金属面垂直方向において電磁波の波長よりも短い領域に局在しており、電場強度が高くなるのが特徴である⁽⁴⁾。可視光領域ではこの高い電場強度を利用して、非線形効果の増強などを行っている。しかし平坦な金属表面において、外部から入射される電磁波の波数は SPP の波数よりも常に小さく、SPP を励起することができない。金属開口の周期構造があると、開口周期の逆格子によって不足波数が補われ、エネルギー及び波数保存則が満たされる周波数において共鳴的に SPP が励起される。この SPP が励起される周波数付近において、図 1(b) で見たような透過ピークが観測される。図 1(d) に、金属開口アレイ表面付近の電場強度分布のシミュレーション結果を示す。金属表面付近に電場が局在し、SPP が励起されているのがわかる。SPP は金属表面を面内方向に伝搬するため、金属部分に入射した電磁波も開口部分に吸い込まれるように入り、金属開口アレイを透過することができる。図 1(b) で見たように、開口率の何倍ものピーク透過率が観測されるのはこの SPP の特性によるものであると考えられる。

最後に金属開口アレイのテラヘルツ領域における応用例を紹介する。上述した SPP は金属表面の状態(誘電率分布)によって非常に敏感に変化し、それに伴って透過スペクトルも変化する。この特性を利用して、金属表面近傍の極微妙な変化を高感度にセンシングすることが可能である。一例として、紙の表面に印刷したインクの検出を行った⁽⁵⁾。インクの厚みは $5\ \mu\text{m}$ 以下と見積もられ、これは波長の 200 分の 1 程度の薄さである。このインクは通常のテラヘルツ分光法では検出が難しいが、金属開口アレイ表面に印刷した紙を貼り付けることによって、透過スペクトルが敏感に変化する。図 2(a) を見ると、インクの有無により透過スペクトルが変化しているのがわかる。この変化によって、紙面上の薄いインクの検出を行うことができる。インクの有無によるスペクトル間の差分を取ると(図 2(b))、金属開口アレイを用いない場合に比べ、金属開口アレイを用いることによって、高いコントラストで微量なインクを検出できることがわかる。このような微量な物質の検出は、波長に比べて非常に薄い領域の屈折率の変化を高感度に調べることができる手法である。よって、無機物質の有無や種類の判別などの応用にとどまらず、生体物質などの微妙な状態変化を高感度に検出することができる可能性もあり、その応用範囲は広いものであると考えている。

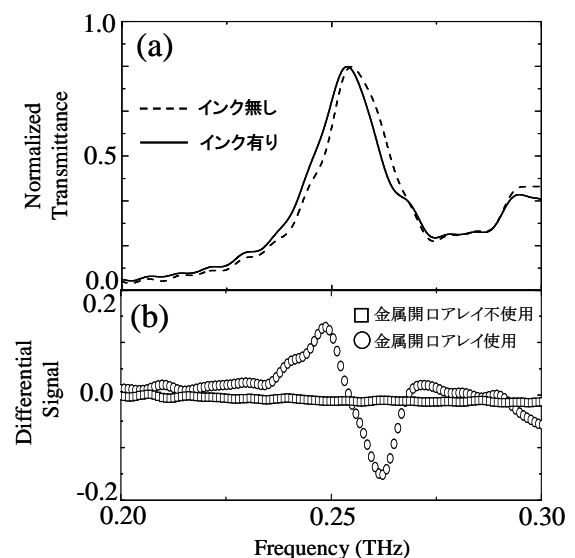


図 2 (a) インクの有無による透過スペクトルの違い
(b) インクの有無における透過スペクトルの差分スペクトル

参考文献

- (1) R. Ulrich, Microwave Research Institute Symp. Ser. 23, 359-376.
- (2) T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolff, Nature 391 667-669 (1998).
- (3) F. Miyamaru and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett. 84 2742-2744 (2004).
- (4) F. Miyamaru and M. Hangyo, Phys. Rev. B 71, 165408 (2005).
- (5) F. Miyamaru, C. Otani, K. Kawase, Y. Ogawa, S. Hayashi, H. Yoshida, and E. Kato, Optics Letters 31, 1118-1120 (2006).