

テラヘルツ領域における金属開孔アレイの透過特性

宮丸 文章*・萩行 正憲**

Transmission Property for Metal Hole Arrays in Terahertz Region

Fumiaki MIYAMARU* and Masanori HANGYO**

The extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays, which is attributed to the resonant excitation of the surface mode, have been investigated in the terahertz (THz) region. The polarization of the THz wave transmitted through metal hole arrays can be changed drastically by tilting the incident angle very slightly, indicating the possibility of using metal hole arrays as wave plates. Additionally, for the double layer metal hole arrays, we found that interesting characteristics which is against the intuitive expectation. By shifting the second layer laterally by a half of the lattice constant with respect to the first layer, the transmittance is enhanced in comparison to that of the unshifted case even though the opening area of the unshifted case is larger than that of the shifted case. This phenomenon is attributed to the near-field coupling of the surface modes.

Key words: metal hole array, extraordinary transmission, surface mode, terahertz wave

金属を材料としたフォトニック結晶が最近注目されつつある。特に、金属開孔アレイ (MHA) の透過特性に関する研究は、1970 年代ころからマイクロ波・遠赤外領域で行われており、高い透過効率のバンドパス特性が観測されている^{1,2)}。さらに 1998 年に Ebbesen らによって、可視光領域において同様の特性が報告されて以来³⁾、この分野の研究は活発に行われるようになった。Ulrich は 1970 年代の当初から¹⁾、MHA の透過特性には表面モードが寄与していると主張し、Ebbesen らも、光の異常透過現象には表面プラズモンが関係していると述べている。電磁波の周波数帯の違いはあるが、両者は本質的に同じ現象であると考えられる。しかし、このメカニズムにはまだ不明な点も多く、未だ議論をよんでいる。本稿では、テラヘルツ (THz) 領域における、MHA のユニークな透過特性について報告する。

1. 金属開孔アレイとその透過特性

図 1(a) の挿入図に MHA の写真を示す。開孔の周期は数百 μm ～数 mm であり、これは THz 波の波長オーダーである。可視光領域では、この開孔周期は数百 nm 程度となり、試料の作製が比較的困難となる。THz 領域では試

料の作製が比較的容易であり、可視光領域では作製しにくい複雑な形状の試料の作製も可能である。

図 1(a) に、入射波 (破線) と透過波 (実線) の時間波形を示す。THz 時間領域分光法を用いることにより、THz 波の時間波形を直接測定することができる。入射波がパルス波形であるのに対し、透過波には 10 数サイクルほどの振動成分が現れており、バンドパス特性を反映している。図 1(b) に透過スペクトルを示す。0.28 THz 付近に、90% 程度の透過率をもつ透過ピークが観測される。THz 波が照射されている面積に対し、開孔部の面積比は約 33% であり、それと比較すると 2.7 倍程度の透過率が得られている。これは一見奇妙な現象である。この結果は、開孔以外の金属部分に入射した THz 波が、開孔に吸い込まれるようにして MHA を透過することを意味している。誌面の都合上詳しくは述べないが、筆者らの研究により、この異常透過現象は、金属表面に励起される表面モードによって引き起こされると考えられている^{4,5)}。

2. 偏光変化現象

前章で述べた異常透過特性以外に、筆者らは MHA の偏光特性について、以下に述べるユニークな波長板効果を

* 理化学研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1) E-mail: fmiyamaru@riken.jp

** 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-6 21 世紀プラザ 3F)

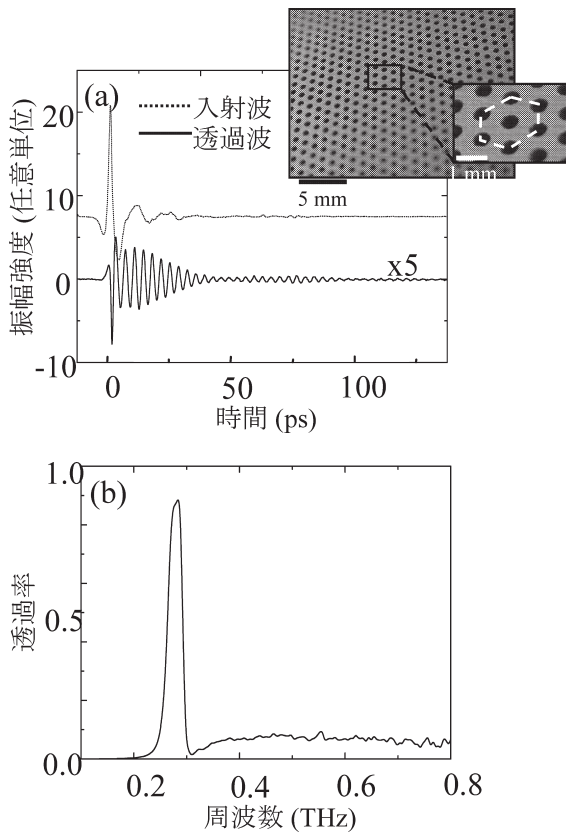


図1 金属開孔アレイ透過後の (a) 時間波形と (b) 透過スペクトル。

見いだした。図2に、MHA透過後のTHz波の偏光状態も含めた時間波形を示す。また、試料と入射波の配置を挿入図に示す。図2(a)は、入射角度が $\theta=0^\circ$ 、入射偏光角度が $\phi=45^\circ$ のときの結果である。入射波の偏光は、 x 軸と平行な直線偏光である。図1(a)と同様に、数周期程度の振動成分がみられるが、偏光状態は入射波と同様である。しかし、入射角度を 3° 程度傾けると、THz波の偏光状態が劇的に変化する(図2(b))。図2(b)の上部に、20 ps、40 ps、50 ps付近における x - y 平面への投影図を示す。20 ps付近では楕円偏光であり、40 ps付近ではほぼ円偏光となっているのがわかる。このように、入射角を垂直入射からわずかに傾けただけで、MHA透過後の偏光に大きな変化が現れる。わずかな入射角の変化に対する偏光の大幅な変化は、金属を材質とした構造体特有のものである。また、入射偏光を変化させるという意味で、MHAを波長板として応用できると考えられる。現在THz領域には波長板として利用できる光学素子がないため、本実験結果は物理的な興味だけでなく、応用の面に関しても重要な意味をもつと考えられる。

3. 2層系における異常透過現象

THz領域では複雑な試料の作製が比較的容易なことか

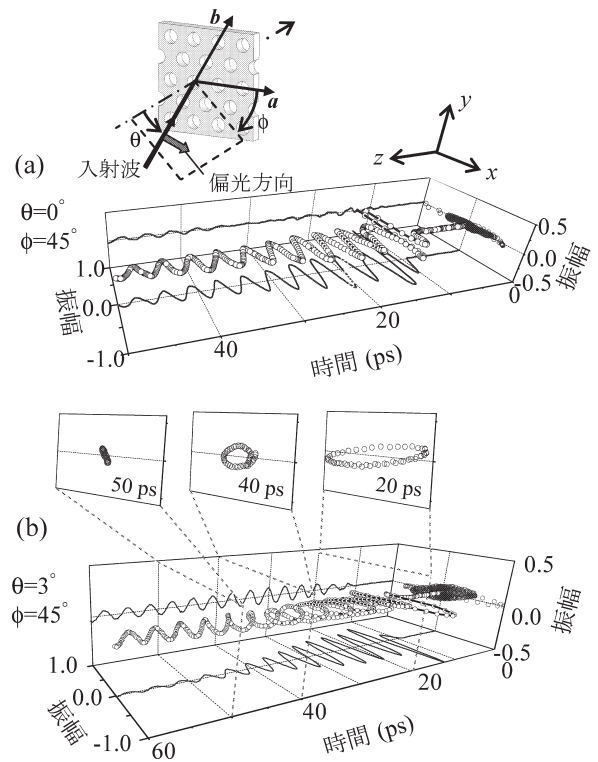


図2 金属開孔アレイ透過後のテラヘルツ波の偏光状態の時間変化。(a) $\theta=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, (b) $\theta=3^\circ$, $\phi=45^\circ$ 。

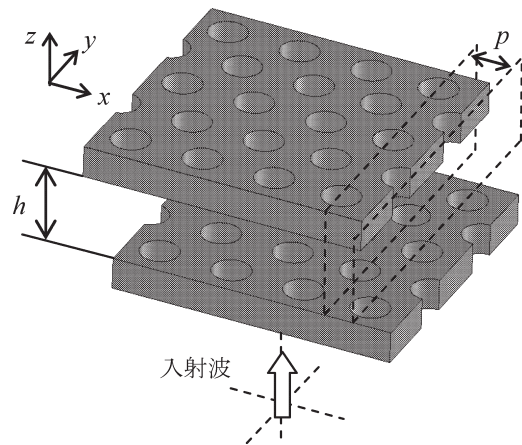


図3 2層系金属開孔アレイの模式図。

ら、MHAを2層積層した系の透過特性も詳細に調べることができる。図3に、2層系MHAの模式図を示す。2層系にすることにより新たに加わるパラメータは、2層間の間隔 h と、面内方向ずれ p である。図4に層間隔に対する、透過スペクトルの変化の様子を示す。用いた開孔アレイの開孔径は0.60 mm、開孔間隔は1.13 mmおよび、板厚は0.25 mmである。横軸が層間隔、縦軸が周波数であり、透過率をグレースケールで示す。図4(a)および4(b)は、それぞれ $p=0$ mmおよび0.57 mmのときの測定

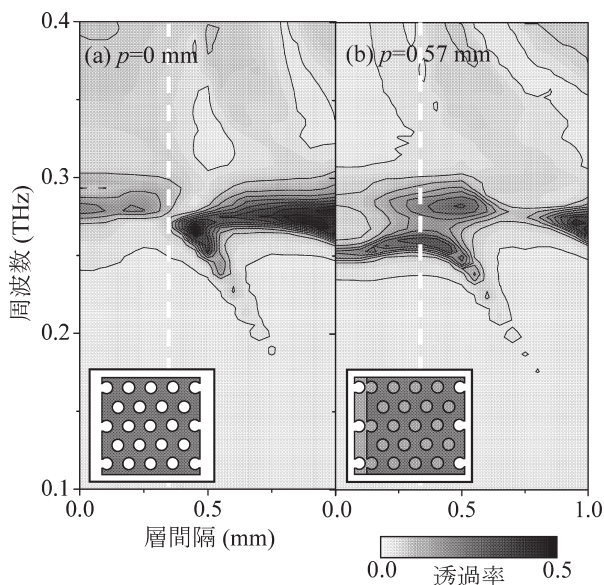


図4 2層系金属開孔アレイの透過スペクトルの層間隔依存性.

結果であり、面内ずれ方向は、六方格子の基本並進ベクトルの向きである。図4(a) および4(b) の透過スペクトルが大きく異なっているのがわかる。例えば、図5に $h=0.35$ mm のときの両者の透過スペクトルを示す。図5において両スペクトルは互いに異なっているが、さらに興味深いことに、 $p=0.57$ mm のときのピーク透過率 (32%) は、 $p=0$ mm のときのピーク透過率 (9%) と比較すると、3倍程度大きい値である。図4(a) および4(b) の挿入図に、入射側からみた模式図を示している。図4(a) では1層目と2層目の開孔位置が一致しており、開口部は大きい。図4(b) では両者の開孔位置が周期配列の半周期ずれており、1層目の開孔は2層目の金属部分によって大部分が遮蔽されている。単純に考えると、 $p=0$ mm のときのほうが $p=0.57$ mm のときよりも開口部は大きく、それゆえ、透過率が高くなると思われる。しかし本実験結果では、この直観的な考えとは逆の結果になっており、一見奇妙と思われる大変ユニークな透過特性が現れている。この現象は、2層の金属アレイ表面に励起された表面モードがカップルすることによって生じ、2つの表面モードのポイ

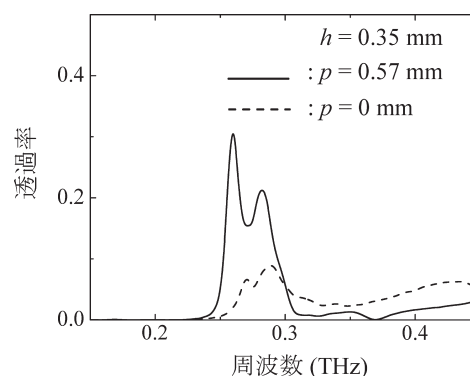


図5 2層系金属開孔アレイの透過スペクトル.

ンティングベクトルの向きが順方向または逆方向に向くことによって、図5のような結果が生じるものと考えている⁶⁾。

本稿では、THz領域におけるMHAの非常にユニークな透過現象について述べた。今後、このようなMHAの透過特性を用いた、THz領域における新規光学デバイスの開発が進むことが期待される。

文 献

- 1) R. Ulrich: "Modes of propagation on an open periodic waveguide for the far infrared," *Microwave Research Institute Symp.*, Ser. 23 (Polytechnic Press, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, N.Y., 1974) pp. 359-376.
- 2) K. Sakai and L. Genzel: *Review of Infrared and Millimeter Waves*, ed. K. J. Button (Plenum Press, New York, 1983) p. 155.
- 3) T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio and P. A. Wolff: "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature*, **391** (1998) 667-669.
- 4) F. Miyamaru and M. Hangyo: "Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in subterahertz region," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 2742-2744.
- 5) M. Tanaka, F. Miyamaru and M. Hangyo: "Effect of thin dielectric layer on terahertz transmission characteristics for metal hole arrays," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1210-1212.
- 6) F. Miyamaru and M. Hangyo: "Anomalous terahertz transmission through double-layer metal hole arrays by coupling of surface plasmon polaritons," *Phys. Rev. B*, **71** (2005) 165408.

(2005年3月25日受理)