

＜研究紹介・自己紹介＞

研究項目 A01: 計画研究イ

「構造共鳴を利用したテラヘルツ波メタマテリアルの作製と機能」

研究分担者 宮丸 文章 (信州大学)

(1) プラズモニック結晶に関する研究

金属薄膜に光の波長と同程度の周期間隔で開口をあけたプラズモニック結晶において、ある周波数のみ、異常に高い透過性を示す“光の異常透過”現象が 1998 年に Ebbesen らによって観測された。プラズモニック結晶(図 1)における“光の異常透過”のメカニズム解明において金属表面上の“表面波”の有無や、その励起状態

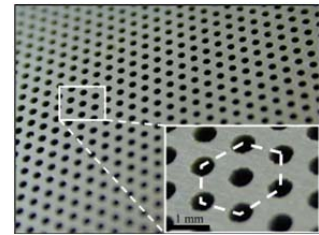


図 1. プラズモニック結晶

が問題の争点になっていた。プラズモニック結晶の研究対象となる周波数領域は、作製する結晶のサイズによって選択することができる。当時多くの研究が、波長が $0.5\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ の可視・近赤外領域を対象としていたのに対して、本研究テーマでは、THz 帯を対象周波数とした。波長が $0.1\text{mm}\sim 1\text{mm}$ である THz 帯を選択することによって、試料の作製が比較的容易になり、それ故、高精度な実験が可能になり、かつ材料の選択性が広がることに着目したためである。

具体的な実験内容として、表面状態が透過特性に与える影響の詳細測定や、光の偏光状態の変化、さらには、材料の性質が金属から誘電体に連続的に変わることによる透過特性の変化を調べた。その結果、争点になって

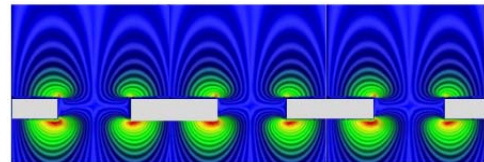


図 2. 表面波の電場分布 (灰色は金属部分)

いた金属表面に励起される“表面波”の存在を明らかにし(図 2)、かつその“表面波”が励起されるダイナミクスなども突き止めた。本研究テーマで行った幾つかの実験はテラヘルツ領域でのみ可能であったものであり、当時多くの研究が行われていた可視・近赤外領域では得ることができないものであった。

さらに、“表面波”を利用することによって、金属表面の微量物質を高感度に検出する応用展開も行った。“光の異常透過”の応用展開に関して、レーザーの効率改善、色フィルター、レンズ効果など幾つかのものが模索されていたが、実用化されたものはまだないのが現状であった。本研究テーマでは、“異常透過”のメカニズム解明を進めている際、プラズモニック結晶の表面状態によって、

透過特性が劇的に変化する特性を見つけ出した。これは“表面波”の存在を裏付ける根拠になったものであるが、その特性を逆に利用することにより、プラズモニック結晶表面上の微量物質を高感度に検出するセンサが実現できることに着目した。図3に、プラスチックフィルム

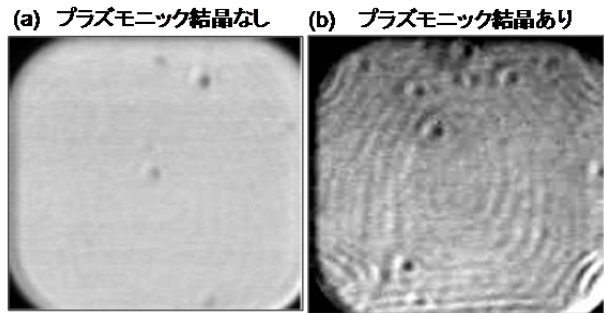


図3. プラズモニック結晶を用いたフィルム上の指紋の検出

上に付着した指紋を、プラズモニック結晶によって高感度に検出した例を示す。図3(a)は、プラズモニック結晶を用いないで試料の THz 波イメージを測定したものであるが、明確な指紋はみられない。それに対し、試料にプラズモニック結晶を貼り合わせると、図3(b)のように、明確な指紋が検出される。このような“表面波”を用いた高感度検出技術は、これまで可視光領域でフラットな金属薄膜を利用して研究・開発が行われている。しかし、それらの方法では、材料自体の性質に大きく依存しているため、利用可能な周波数が可視光領域付近に限られており、また装置自体も非常に繊細な調整と精度が必要である。それに対し、プラズモニック結晶では、開口間隔などを設計することによって対象とする周波数帯を自由に選択することができ、かつ単純に透過率を測定するだけで、微量物質を高感度に検出することができるところに、本技術の優位性がある。

(2) メタマテリアルに関する研究

メタマテリアルに関しては、前述のプラズモニック結晶と連続する形で研究を始めた。例えば、ネジ型の開口を周期的に配置した金属構造物において、大きな光学活性を見出した。これは周期的に金属開口を配置することはプラズモニック結晶に近いが、光学活性の発現機構はこのネジ型開口が寄与しており、その意味でメタマテリアルと呼べるものと考えている。また金属開口アレイの開口径と開口の周期との関係が異常透過のピークにどのように寄与するのかを詳細に調べた結果、周期に対する開口径の大きさによって、異常透過ピークのメカニズムが表面波依存から、開口形状依存に移り変わっていく様子を観測した。開口形状に依存する透過特性は、まさにメタマテリアルと呼ぶべきものであるため、本研究結果は、プラズモニック結晶からメタマテリアルに移り変わ

る様子とそれぞれの適用範囲を明らかにしたことを意味する。

数年前から、分割リング共振器型のメタマテリアルに関する研究を始め、主なテーマとして3次元のメタマテリアルの作製を行なっている。これまで報告されているメタマテリアル研究は2次元のものがほとんどで、3次元のメタマテリアルに関する実験的な研究は非常に少ない。その理由の1つとして、2次元メタマテリアルの作製方法としてフォトリソグラフィーが利用されることが多いが、その基板材料として半導体やガラスを用い

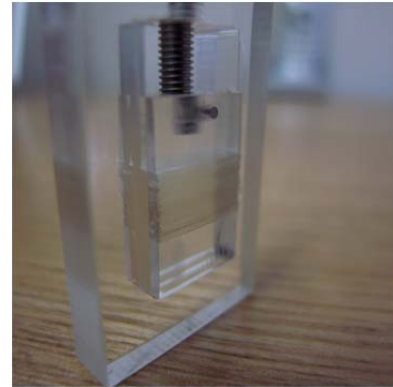


図 4. 3次元メタマテリアル

ることが多いためである。テラヘルツ領域において、半導体やガラスの屈折率は一般的に大きく、そのため、2次元メタマテリアルを積層し、3次元化する際に、層間の光学距離が波長よりも大きくなってしまい、メタマテリアルとして要求されるサブ波長の周期性が実現することができない。そこで本研究では、基板材料としてプラスチックシートを用いることにより、光学距離をサブ波長に保ちながら積層することを可能にした。その結果、数万個のユニットセルを有する3次元のバルクメタマテリアルをテラヘルツ領域で初めて作製することに成功した。メタマテリアルの3次元化により、これまで間接的な測定しかできていなかった、分割リング共振器の入射磁場による共鳴を直接観測することができるようになった。今後は、3次元メタマテリアルの特性を生かして、透磁率が有効的に負である物質と空気との界面に励起される表面波の実験的観測などを行なっていく予定である。