

# テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.4, No.2 (2006)

## テラヘルツテクノロジーの産業化への期待

1990年代初頭、アイシン精機の研究開発法人であるイムラ・アメリカで、自動車技術への応用を目指してフェムト秒レーザーの研究を開始いたしました。初期コンセプトが車に搭載できるレーザーであったため、小型化できて調整が不要なファイバーレーザーに着目致しました。フェムト秒ファイバーレーザーの研究推進に当たっては、世界中から研究者を集め、その叢智を結集して1997年世界に先駆け『フェムトライト』の商品化に成功いたしました。生産・販売開始当初より、小型・調整不要の特性を活かし産業の役に立つレーザーを目指して応用探索活動をして参りました中で、有力候補として『テラヘルツ波時間分解分光』が出現いたしました。

当時はテラヘルツ波技術が研究用基礎科学分野から産業応用分野への移行を開始していた時期であり、橋渡しをするシステムがなかったため、技術の産業への移行は滞っておりました。しかし、テラヘルツ波関連の国産技術は非常にレベルが高く、放っておけば外国に知財権を奪われてしまうことが危惧されておりました。このような環境を鑑み、阪井清美先生主導の下、テラヘルツテクノロジーフォーラムが設立され、弊社は設立当初より、テラヘルツ波関連技術発展のため、微力ながらお手伝いをさせていただきました。本フォーラムは今年で5年目を迎え、産学官連携を推進して参りましたが、テラヘルツ波により、郵便物中の禁止薬物非破壊検出、IC検査・故障解析への応用など従来技術ではできなかったことができるようになり、そのメカニズムも解明されてきており、少しずつですが用途も見えてきており、産業界からも次世代医療、医薬、バイオ、工業材料など産業への期待が高まって来ているものと実感しております。

今後は、これまで基礎研究で提示されてきた応用の可能性から、このテラヘルツテクノロジーフォーラムを基軸として、日本が世界に発信する創造性のある新規産業が生まれていく事を願ってやみません。

是非、多くの皆様の御支援、御協力を賜ります事をお願い致します。

テラヘルツテクノロジーフォーラム副会長

齋藤 雅康

# 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<sup>(1), (2)</sup>. 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<sup>(3)</sup>. 開口の周期は 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

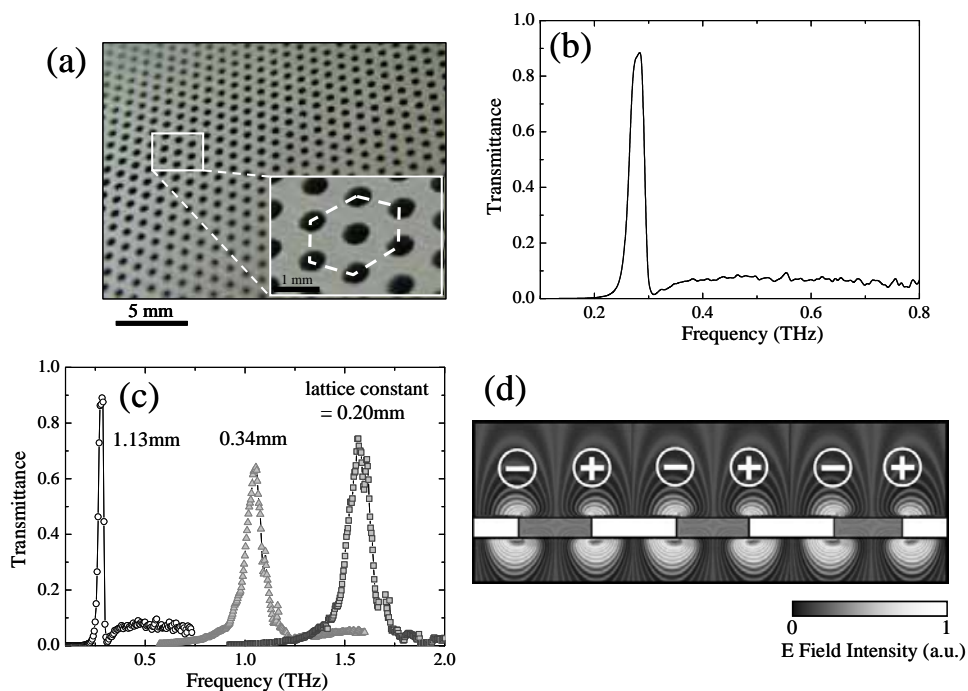


図 1 (a) 金属開口アレイ (b) 金属開口アレイの透過スペクトル (c) ピーク周波数の開口間隔依存性 (d) 金属開口アレイ表面付近の電場強度分布シミュレーション

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<sup>(4)</sup>。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少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<sup>(5)</sup>。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。

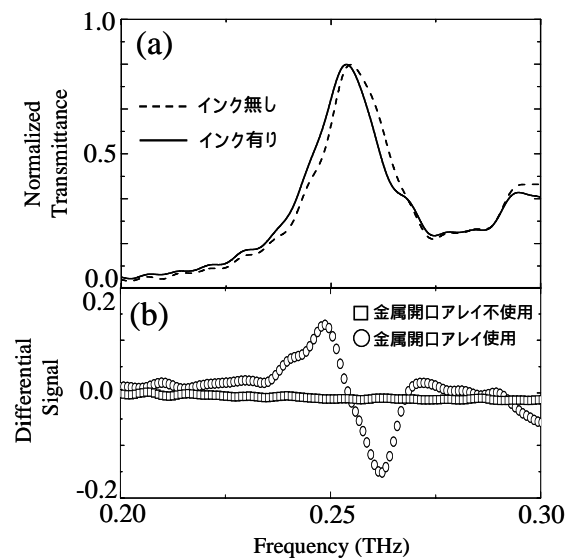


図 2 (a) インクの有無による透過スペクトルの違い  
(b) インクの有無における透過スペクトルの差分スペクトル

## 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).

理化学研究所 フロンティア研究システム  
 テラヘルツ光研究プログラム テラヘルツイメージング研究チーム  
<http://www.riken.jp/lab-www/THz-img/>

理化学研究所ではこれまで、仙台・フォトダイナミクス研究センターの光発生・計測研究チーム及び埼玉県・和光本所の川瀬独立主幹研究ユニットにおいて、テラヘルツ波発生と応用研究が進められて来た。これらのアクティビティが統合・発展する形で2005年10月よりフロンティア研究システムの5年プログラム(テラヘルツ光研究プログラム)が仙台でスタートした。同プログラムは理研仙台の3研究室で構成される。波長可変光源の研究開発を行なうテラヘルツ光源研究チーム、量子カスケードレーザー等の次世代型半導体光源の研究開発を担うテラヘルツ量子素子研究チーム、そして、検出と応用の研究開発を進めるテラヘルツイメージング研究チームである。イメージングチームでは、センシング・イメージング・応用研究を基軸として、テラヘルツ分野の科学・技術・応用の確立を目指して研究を進めている。最近の主たる成果としては、封筒中の禁止薬物等の検査システムの開発、高感度のアレイ型超伝導テラヘルツ検出デバイスの開発、分光イメージングとケモメトリクスを利用したガン病理組織診断技術の研究などが挙げられる。



図1 封筒検査のためのスクリーニング部(手前)と分光検査部(右端)

封筒中の禁止薬物等の検査システムの開発では、文部科学省科学技術振興調整費のプロジェクトの一環として、特に封筒中の禁止薬物の非開披検知を目的として、疑わしい封筒を選別するスクリーニング部と薬物同定を行なう分光検査部の開発と現場利用の検討を関係機関と共同で進めている(図1)。高感度の超伝導検出器アレイの開発では、超伝導トンネル接合素子を利用した直接検出型の6×6素子アレイを作製している(図2)。また、国立天文台と共同で、南米チリのALMA望遠鏡サイトに置かれたASTE望遠鏡にこの素子を搭載した実験もスタートさせている。さらに、テラヘルツ波吸収体で発生する高周波フォノン検出を利用した新たな広帯域検出デバイス開発も進めている。

医学応用研究では、肝癌の病理切片のテラヘルツ分光イメージングデータにケモメトリクスの主成分分析とクラスタ分析を組み合わせた解析を適用し、ガン病変部位の自動識別の検証を行っている。このような手法は、ガン診断のみならず他の様々な解析にも利用可能と期待される。また、気体の分光的研究、フォトニック結晶を利用したセンシング、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡などの研究のほか、企業等との共同研究も推進しており、基礎科学から応用にわたって研究開発を進めている。



図2 6×6素子の超伝導テラヘルツ検出アレイ

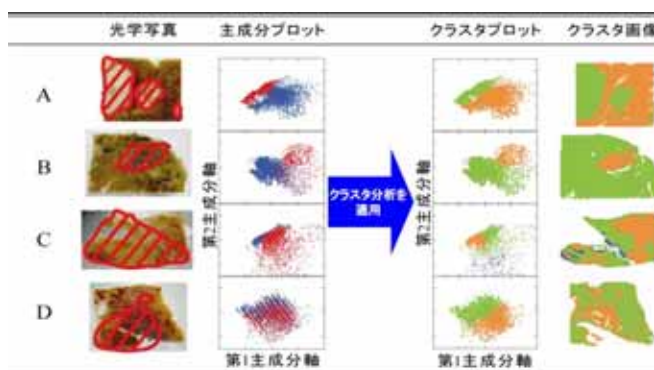


図3 ケモメトリクスを利用した肝癌病理切片のテラヘルツ波診断結果

## 会議報告

### < IRMMW-THz2006 会議報告 >

第 31 回赤外ミリ波・テラヘルツエレクトロニクス合同国際会議(Joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, IRMMW-THz2006)が上海で 9 月 18 日から 5 日間の日程で開催された。招待講演を除く投稿論文数は約 650 で、非常に盛況であった。

会議は Plenary 講演(全員参加型招待講演), 一般口頭発表とポスターセッションで構成されていた。昼食は会場となっているホテルで用意されており, その点は便利だったのだが, 一般講演が 7 ~ 8 個の平行セッションに分かれていて, 聞きたい講演が同じ時間帯の別のセッションにあることも多く, 会場内を走り回ることとなった。テラヘルツ電磁波関連の講演だけでも非常に多岐にわたり, ここでそれらを網羅することは適切ではないと思われるので, もっとも印象に残ったレンセラー大学(Rensselaer Polytechnic Institute)の X.-C. Zhang 教授による Plenary 講演について紹介する。会議のプログラムはまだ Web サイトに掲載されているので, より詳細を知りたい方は会議の Web サイト[1]を参照していただくとよい。

X.-C. Zhang 教授の講演では、空気プラズマを用いたテラヘルツ電磁波放射と検出[2-3]についての詳細が報告された。高強度のフェムト秒レーザーを空気中で集光すると、気体プラズマが生成されるが、このプラズマ中の 3 次の非線形光学効果でテラヘルツ電磁波を発生させ、その逆過程を利用して発生したテラヘルツ電磁波を空気プラズマ中でサンプリング検出するというものである。従来用いられていた 2 次の非線形性を持つ電気光学結晶(ZnTe など)を用いた場合と同程度かそれ以上のテラヘルツ発生・検出効率を得られ、放射・検出が特別な素子なしに普通の空気を使ってできることから、屋外でのリモートセンシング技術として応用できる可能性がある。大型装置である再生増幅フェムト秒レーザーを使う必要があるが、空気をテラヘルツ放射および検出の媒質として利用している点が画期的である。

(大阪大学 谷 正彦)

[1] IRMMW-THz2006 学会 URL: <http://www.sitp.ac.cn/irmmw-thz2006/Program.asp>

[2] X. Xie, J. Dai, and X.-C. Zhang: Phys. Rev. Lett. **96**, 075005 (2006).

[3] J. Dai, X. Xie, and X.-C. Zhang: Phys. Rev. Lett. **97**, 103903 (2006).

### < 第 5 回研究会・見学会 >

2007年12月5日、東京の情報通信研究機構小金井本部において研究会・見学会が開催された。この研究会・見学会はテラヘルツテクノロジーの最先端の情報を研究現場近くで提供することを目的として企画されており、3月の東京駒場キャンパス・生産技術研究所での研究会・見学会に続いて5回目の開催となる。今回の研究会・見学会では約 50 名の参加者があり、講演会のみならず研究現場の見学時においても非常に活発な議論が行われた。

研究会ではまず欧州宇宙機関のドゥマグト博士によって宇宙やリモートセンシング、医療、イメージングなど幅広い応用を踏まえたテラヘルツセンシング技術に関する講演があった。次に情報通信研

究機構の瀬田博士による大気計測に関する講演があった。テラヘルツ領域は他の周波数領域に比べて減衰係数が大きいいため、イメージングや通信を行う上では大気の状態による減衰特性の変化に関する情報が必須となる。最後に竇迫博士によるテラヘルツ量子カスケードレーザー (QCL) に関する講演があった。サブバンド間遷移を用いた新しいタイプの半導体レーザーであり、その基本原理と室温動作への可能性について紹介された。

後半では3つのグループに分かれて情報通信研究機構の見学会が行われた。主な見学先としてはクリーンルーム、MBEなどが設置されているフォトニックデバイスラボ (PDL) で作成した QCL などを評価する THz - BASIC ラボ、成層圏における 650GHz 帯のスペクトルを観測する気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES) である。  
(京都大学 永井正也)

### < 電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会 >

#### ・ 第7回研究会

第3回 MWP・THz 合同研究会 (第4回マイクロ波・ミリ波フォトニクス (MWP) 研究会、第7回テラヘルツ応用システム (THz) 研究会) を1月26日に広島市立大において開催いたしました。招待講演2件、一般講演7件の計9件の大変興味深い講演が行われ、参加者は42名でした。招待講演は、「ミリ波の細胞照射の影響とミリ波を用いた細胞培地の凍結モニタリング (理研・名大)」、「半導体結晶を用いた THz 波光源・分光装置とそのシステム応用 (東北大・半研)」の講演があり、何れも盛んな質疑が行われました。

#### ・ 電子情報通信学会総合大会シンポジウム

電子情報通信学会総合大会 (名城大学) において「テラヘルツ波技術の進展と実用化への展望」と題するシンポジウムが THz、LQE、OPE 共催で3月23日に開催されました。招待講演6件、一般講演2件の講演が行われました。参加者は60名弱でした。テラヘルツ技術を用いた通信、セキュリティ、センシング応用事例や、新規デバイス開発の最前線が報告され、テラヘルツ技術が社会に役立つものとして広がりつつあることを実感させられるものでした。特に通信に関する講演では、実証実験が進みつつある 10 G/s の無線伝送や将来の展望も示され、聴衆の興味を多く引き付けていました。

ご講演・ご参加いただきました皆様、また、現地にて会場準備を行っていただいた皆様にこの場をお借りして感謝申し上げます。

(情報通信研究機構 竇迫 巖)

### < 応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会 >

2007年3月2日(金)~3月3日(土)に加賀温泉ホテルゆのくに天祥において、テラヘルツ波を用いた分光およびイメージング技術に関する討論会を開催した。2件のチュートリアル講演「走査プローブレーザーテラヘルツ放射顕微鏡」(大阪大学・井上亮太郎氏)、「全反射分光法の基礎と応用」(京都大学・永井正也氏)には、いずれも70分という十分な時間を設定した。基礎から最近の研究結果までを含む総合的なレクチャーであった。このほか、7件の一般講演では、電気光学検出による2次元イメージングにおける残留複屈折のキャンセル方法(筑波大・服部氏)や、同じく生体試料の2次元イメージングの状況(阪大・江夏氏)、THz帯 CARS の状況(阪大・小泉氏)、アンテナを用いた偏光依存 THz 検出(阪大・真壁氏)、一体成型 THz 分光ユニット(東大・渡邊氏)などの他、テラヘルツ磁気共鳴力顕微鏡(福井大・戸田)や GW クラスレーザーを用いた超高強度 THz 波発生 (INRS, Blanchard 氏)



【参加費】 一般 3,000円 学生 1,000円

【プログラム案】

2007年7月5日(木) 13:00~17:00 招待講演(英語)、一般講演(英語)

2007年7月6日(金) 9:00~12:00、13:00~16:00 一般講演(日本語)

2007年7月7日(土) 10:30~12:00 施設見学会

【参加申し込み・問い合わせ先】

応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会・担当者 南出泰亜(理化学研究所)

TEL: 022-228-2162、FAX: 022-228-2050、E-mail: minamide@riken.jp

電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会・担当者 関根徳彦(情報通信研究機構)

TEL: 042-327-5848、FAX: 042-327-6941、E-mail: nsekine@nict.go.jp

< 2007分析展 >

分析展展示

【日時】 2007年8月29日(水)~8月31日(金) 午前10時~午後5時

【場所】 幕張メッセ国際展示場

2007分析展JAIMAコンファレンス: 第2回テラヘルツテクノロジーフォーラムセミナー

【日時】 2007年8月29日(水) 午後1時~5時

【場所】 幕張メッセ国際会議場 304会議室

< 第1回 日韓ワークショップ Japan - Korea Joint Workshop >

日本、韓国よりそれぞれ5~6名(招待講演者のみ)の講演を行います。

【日時】 2007年8月25日(土)

【場所】 韓国ソウル市(詳細は未定)

< 国際会議予定 >

**CLEO/QELS 2007**

May 6-11, 2007, Baltimore, Maryland, USA, <http://www.cleoconference.org/>

**IRMMW-THz 2007 (TBA)**

September 2-7, 2007, Cardiff, UK, [http://www.irmmw-thz.org/future\\_conf](http://www.irmmw-thz.org/future_conf)

**テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.4 No.2 1000部 無料**

発行日 2007年4月10日

企画・編集 田中 耕一郎(京都大学大学院理学研究科)

電子メール: [kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp)

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学大学院理学研究科 物理学第一教室 光物性研究室

Tel /Fax 075-753-3757

E-mail: [teratech@terahertzjapan.com](mailto:teratech@terahertzjapan.com)

<http://www.terahertzjapan.com>