

レーザー励起テラヘルツ波の高度応用

Advanced Application of Laser Excited Terahertz Waves

萩行 正憲 (Masanori Hangyo)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心・教授



研究の概要

最近急速な発達を遂げているテラヘルツ技術をさらに高度化するとともに、磁気光学効果測定システムの開発と物性測定への応用、テラヘルツ・フォトニック結晶の開発と特性評価、生体関連物質の低振動スペクトルの測定などの応用領域を開発する。また、安価な半導体レーザーを用いたシステムを構築する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：テラヘルツ波、フェムト秒レーザー、物性、生体分子

1. 研究開始当初の背景・動機

テラヘルツ波は従来未開拓電磁波と呼ばれて、限られた学術領域での研究に留まっていた。近年、超短パルスレーザーを用いてテラヘルツ波を発生する技術が進展し、広範な応用が期待されるようになってきた。研究代表者は、これまで我が国のテラヘルツ研究の初期から研究に携わってきたので、その経験を生かして多様な分野で新しいテラヘルツ技術の先駆的な応用を進める。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者らが開発してきた分光やイメージングの手法を、新しい材料やバイオ関連試料の高度な測定に応用し、将来の広範なテラヘルツ技術応用の基礎を築くことである。テーマとしては、1. 放射機構の解明と光源開発、2. 磁気光学効果測定システムの開発と応用、3. テラヘルツ・フォトニック結晶の開発、4. 生体関連物質の低振動スペクトルの測定、5. 安価な半導体レーザーを用いたシステムの構築、である。

3. 研究の方法

上記1~5のテーマを並行して進めた。研究代表者の萩行は、全テーマに関わったが、分担者の長島は、主に磁気光学効果測定システムの開発とその応用を担当した。また、研究協力者として森川が2と5、谷が、1と4のテーマに参加した。広範な応用については、効率的に研究を進めるために各専門分野の研究者に協力を依頼した。

当初予定した磁場発生装置については、他の予算で購入可能となったため、現在のテラヘルツ分光装置を補完する意味で、6THz以上の測定が可能な赤外分光装置を導入した。また、薄膜試料作製のためにレーザーアブレーション装置を導入した。

4. 研究の主な成果

研究テーマ別に主な成果を述べる。

1. 放射機構の解明と光源開発

2で述べる磁気光学効果測定装置を用いて、フェムト秒レーザー励起によるn-InAs表面からのテラヘルツ波放射の磁場依存性を測定し、約5Tで波形の極性反転が起こることを見出した。この現象を表面でのフォトデンバー効果と磁気プラズマ波の発生・伝搬の競合として説明した。磁場を用いないで放射強度を増大する手法としてMgOレンズを装着することを提案し、約50倍の強度増強を得た。また、ウェッジ型のZnTe試料を用いて、光整流効果によりスペクトル領域を制御しながら60THzまでの放射を得た。また、多電極型の光伝導アンテナを開発し、偏光を高速で変調することに成功した。

2. 磁気光学効果測定システムの開発と応用

GM式冷凍機を用いた5~300K、±10Tの磁気光学効果測定システムを開発した(次ページの写真参照)。このシステムでは、振動同期サンプリングを採用することにより、振動ノイズを完全に除去することに成功した(特許申請中)。このシステムを用い



て、n-InAs や Si ドープ GaAs の磁気光学効果、GaAs 量子井戸のサイクロトロン共鳴を従来にない精度(楕円率と回転角)で測定した。また、クロスニコル法と磁場反転差分法を採用することにより、初めてテラヘルツ時間領域分光法を用いて電子スピン共鳴(ESR)スペクトルを得ることに成功した。

3. テラヘルツ・フォトニック結晶の開発

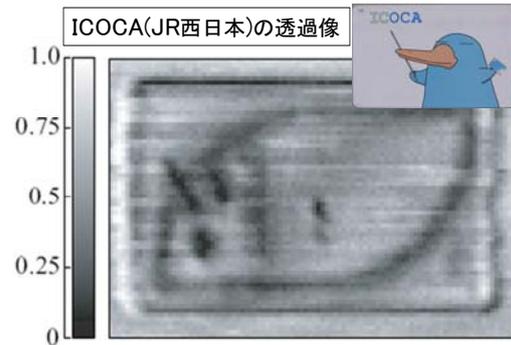
2次元金属開口配列(MHA)において、偏光変換現象を見出し、表面プラズモン・ポラリトン(SPP)がこの現象に関与していることを示した。また、2層積層型 MHA での異常透過現象、ネジ型 MHA での巨大光学活性などの新しい現象を見出した。さらに、TiO₂ のテラヘルツ誘電率が 100 以上であることに着目し、誘電体ボックス配列を作製することにより負の透磁率を有するメタマテリアルを開発した。

4. 生体関連物質の低振動スペクトルの測定

アミノ酸の測定を行い、L 体あるいは D 体と DL 体(ラセミ体)ではスペクトルが全く異なることを見出した。これは新しい化学分析法への応用が可能である。また、アミノ酸が少数結合したオリゴマーでは比較的シャープなスペクトルが得られるが、ポリペプチドやタンパク質ではブロードな特徴のないスペクトルとなることがわかった。ニワトリ卵白リゾチームについては、テラヘルツスペクトルの水分量および温度依存性が、準弾性および非弾性中性子散乱スペクトルと非常に良く似ていることから、ダイナミクスと生理機能の関係を調べるための手法としてテラヘルツ分光が有効であることがわかった。

5. 安価な半導体スペクトルを用いたシステムの構築

CW マルチモードレーザーダイオードを用いたテラヘルツ分光システムについて、モードの純度を上げるために新たにシングルモード光ファイバーを使用した結果、S/N 比の大幅な向上に成功した。レーザー



の選択と光ファイバー結合の光伝導アンテナの採用により、単一周波数のサブテラヘルツ波を放射し、これを用いて振幅と位相のイメージングが可能であることを示した(上図参照)。

以上の他、プロセス用ガスプラズマの非接触診断(阪大浜口研との共同研究)にもテラヘルツ波が有用であることを示した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

先に述べた成果は、いずれもオリジナリティの高いものであり、さらに、超高速 ESR、新しいメタマテリアル開発、タンパク質ダイナミクスの研究などの将来性のあるテーマにつながるものである。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

1. K. Shibuya, M. Tani, **M. Hangyo**, O. Morikawa, and H. Kan, "Compact and inexpensive continuous-wave subterahertz imaging system with a fiber-coupled multimode laser diode", Appl. Phys. Lett. **90** (16), pp. 161127-1-3 (2007)
2. H. Sumikura, T. Nagashima, H. Kitahara, and **M. Hangyo**, "Development of a cryogen-free terahertz tie-domain magneto-optical measurement system", Jpn. J. Appl. Phys. **46** (4A), pp. 1739-1744 (2007)
3. 萩行正憲、山口真理子、山本晃司、谷正彦、西村博明、「テラヘルツ分光とその生命科学への応用」、日本中性子学会誌 **17** (1), pp. 67-73 (2007)
4. **M. Hangyo**, M. Tani, and T. Nagashima, "Terahertz time-domain spectroscopy of solids: A review", Int. J. Infrared and Millimeter Waves **26** (12), pp. 1661-1690 (2005)
5. F. Miyamaru and **M. Hangyo**, "Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in subterahertz region", Appl. Phys. Lett. **84** (15), pp. 2742-2744 (2004)

ホームページ等

<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/~ths/hangyo/Lab/index.html>