

テラヘルツセンシング・イメージング工学の開拓

斗内 政吉

レーザーエネルギー学研究センター

概要: 本研究では、テラヘルツセンシング・イメージング工学の創成に資する基盤形成を目的として、新機能性電子材料のテラヘルツ科学、テラヘルツ機能性デバイスの開発、並びに、テラヘルツ応用システムの開発に取り組んでいる。特に重要な課題として、以下のものに取り組んだ。

- 1) BFO材料からのテラヘルツ波発生と機構解明
- 2) NCMOからのテラヘルツ波発生スピン状態依存性の観測
- 3) 高温超伝導体ジョセフソン接合によるフェムト秒レーザー励起テラヘルツ電磁パルスの計測
- 4) テラヘルツ帯で動作可能な超高速光磁束量子変換デバイスの開発、
- 5) DAST結晶を用いたテラヘルツ時間領域分光装置の開発
- 6) 高速イメージングレーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発

はじめに

テラヘルツ光・電磁波の利用は将来の重要技術として、注目を浴びている¹⁻³⁾。テラヘルツ波は、周波数では約300GHzから30THz程度の領域をさし、テラヘルツフォトニクス、テラヘルツエレクトロニクス分野を包括することで、生命・医療・健康・工業・宇宙・環境・安全/安心・情報通信・基礎科学など、広範な領域における展開が期待されている。テラヘルツ技術が必要とされる理由としては、

- 1) THz分光・イメージングなどによる新しいセンシング技術の創製
- 2) 大容量情報通信を目指した技術革新基盤を提供
- 3) 新しいサイエンスの創成
- 4) 先進国としての社会貢献技術基盤の形成があげられる。

1)では、THzエネルギーが生体の“ゆらぎ”エネルギーに近く、X線などに比べて安全という観点と、テラヘルツ帯において、様々な有機分子が識別可能な特徴的吸収を有する点などから、バイオ・生体・セキュリティ・非破壊検査への展開が期待されている。2)では、極限デバイス・電子回路の開発には次世代電子材料のテラヘルツ波物性評価不可欠であること、ならびに様々なデバイス開発に伴い、10Gbpsを超える無線技術や100GHzを超える周波数で動作可能な論理回路が実現されたことなどを受けて、次世代電子デバイスのテラヘルツ動作を目指した研究開発が加速している。3)では、フェムト秒レーザーの進展

により、超高速現象の過渡的観測が可能となり、高輝度テラヘルツパルスの実現とあいまって、固体物理学における本質的電荷相互作用の解明など新しい物理現象を露わにできるようになってきた。4)としては、まだ商業応用に割り当てられていない電磁波(275GHzから3THz)の利用にあたって、標準化、EMCなどの検討、ならびに環境計測や電波天文での応用が重要である。本研究では、その基盤を形成するものとして、新機能性電子材料の光テラヘルツ波機能の創製、テラヘルツ機能性デバイスの開発、並びに、テラヘルツ応用システムの開発などに取り組んでおり、その概要を説明する。

研究成果

<新機能電子材料のテラヘルツ科学>

テラヘルツ帯は、研究開発が困難であり、未開拓電磁波領域とも呼ばれている。次世代のテラヘルツデバイスの開発に向けては、まずこの帯域の光・電子物性を明らかにし、また、新奇テラヘルツ機能の創製に向けた探索的研究が重要である。本プロジェクトでは、様々な電子材料のテラヘルツ波物性の評価と新機能の創成を探索的に探究している⁴⁻⁸⁾。

新機能性材料の中で、強相関電子系材料は、電荷、スピン、軌道の自由度が複雑に絡み合い、超巨大磁気抵抗効果など様々な新規物性が発見され、次世代電子材料として広く研究されている。特に近年、複

数の秩序状態が同一相の中で存在するマルチフェロイック材料が注目されている。しかしながら、強相関材料やマルチフェロイック材料に対する光科学からの取り組みは少なく、光機能の探索が望まれる。我々は、これまでに、様々な電子材料からの光励起テラヘルツ波の発生に成功してきた⁸⁾。最近では、代表的なマルチフェロイック材料であるBiFeO₃(BFO)はからのテラヘルツ波発生を見出し、注目を集めている⁹⁾。本研究では、不明であったメカニズムの解明に取り組んだ。図1(a)にBFOの構造、(b)にテラヘルツ波発生のための光スイッチを示している。本研究では、結晶成長を制御し、様々な方位のBFOからテラヘルツ波の発生を観測し、(c)(d)に示すように、テラヘルツ波発生が大きく方位に依存することを見出し、その結果、自発分極光励起による直接自発分極変調がテラヘルツ波の発生を担っていることを明らかにした^{4,8)}。

その他、Nd_{0.5}Ca_{0.5}MnO₃(NCMO)など様々な材料のテラヘルツ波物性評価と光機能の探索に取り組む、テラヘルツ波の発生がスピン状態に大きく依存することや、電荷密度波の励起の観測に成功するなど成果を上げている^{6,7)}。

<テラヘルツデバイス>

新しい材料のテラヘルツ波発生に取り組むとともに、テラヘルツ波検出デバイスの開発にも取り組んでいる。図2(a)に高温超伝導体YBCO薄膜を用いて試作したジョセフソン接合デバイスを示す。このデバイスのフェムト秒レーザー励起テラヘルツ波電磁波パルス応答を初めて観測した。その結果を図2(b)に示す。テラヘルツパルス入射に対して、電圧が発生し、テラヘルツ電界を検出していることがわかる。CW電磁波と異なり、ブロードな電圧特性を示していることが見出された。今後は、高感度化により、テラヘルツ波検出デバイスとしての性能を評価するとともに、テラヘルツイメージングなどへの応用に取り組む。

また、テラヘルツエレクトロニクスを担うフォトニックデバイスとして、高温超伝導磁束量子フロントランジスター(FFT)の開発に取り組んでいる。これまでに、YBCO薄膜で作成したジョセフソンボルテックス-FFTにおいて、フェムト秒信号と電気信号の演算ならびに光演算に初めて成功し、応答速度が5ps以下であること明らかにした。今後は、微細化によりテラヘルツ帯デバイスに資するデバイス開発を目指す。

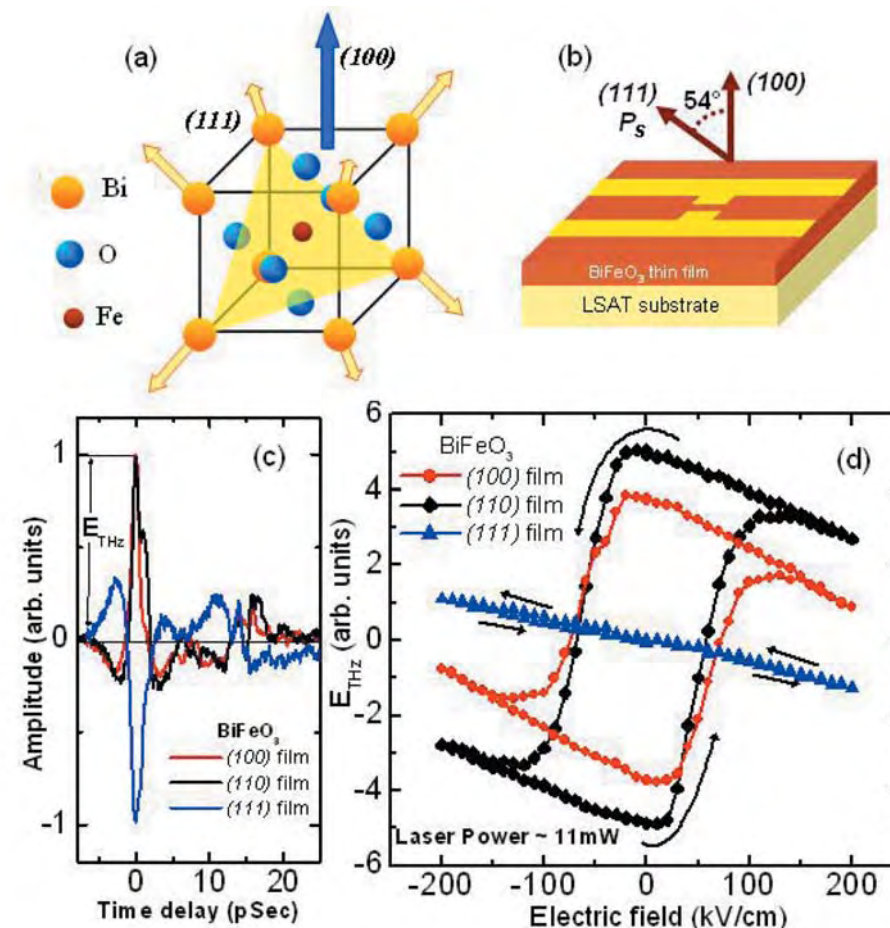


図1 (a)BFOの構造。(b)光スイッチ。(c)テラヘルツ電磁波。(d)最大振幅の電界依存性。

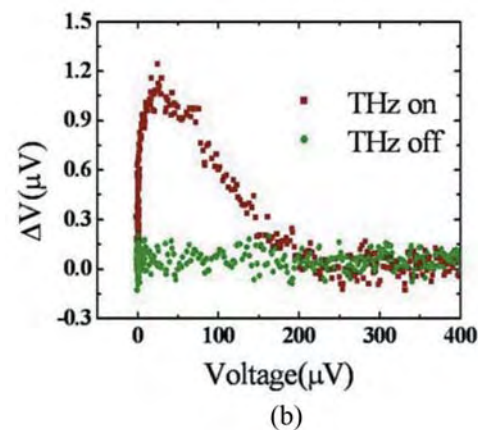
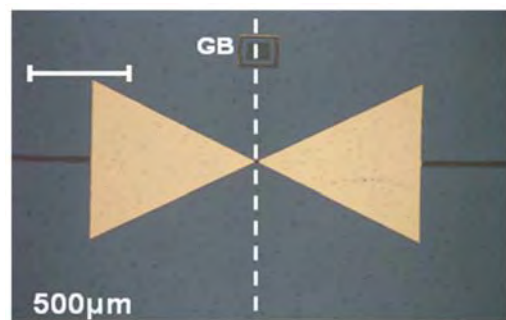


図2 (a) 試作デバイス。(b)テラヘルツ波検出特性。

<新型テラヘルツ時間領域分光装置の開発>

テラヘルツ波光源として非線形有機結晶を用いた光テラヘルツ波変換は重要な候補である。本プロジェクトでは、フェムト秒レーザー励起による様々な有機結晶からのテラヘルツ波発生を探索し、光源への応用に取り組んでいる。これまでの成果として、波長1.5μm帯のフェムト秒レーザーを用いることで、DAST結晶から発生するテラヘルツ波が広帯域であることを見出し、その時間領域分光法に適用することにより、従来の市販のテラヘルツ時間領域分光装置より高性能なものが構築できることを明らかにした¹⁰⁾。図3(a)にDASTから発生するテラヘルツ波スペクトルとそのInP基板評価に適用したものを示す。約500μmのInP基板の物性値(光学定数・移動度・導電率・電荷密度など)が5THz程度まで求めることができた。また、大塚電子株式会社と共同で、本結果を実用化システムに適用し、新型テラヘルツ時間領域分光装置(b)の開発に成功した。今後は、DAST結晶の欠点である、1.1THzの吸収のない有機結晶の探索を行う予定である。

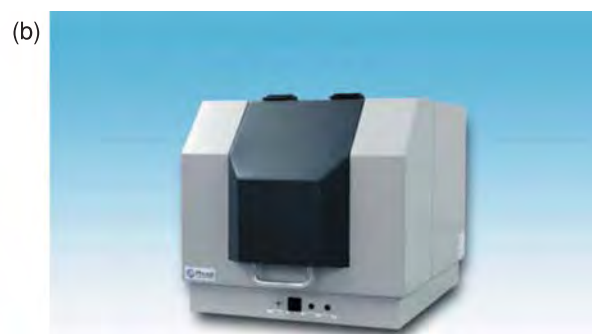
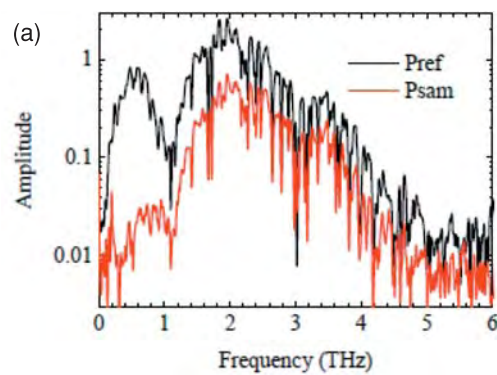


図3 (a)DAST結晶から放射されるテラヘルツ波の周波数スペクトルとノンドープInP基板を透過したスペクトル。(b)大塚電子株式会社と共同開発したテラヘルツ電磁波時間領域分光装置。

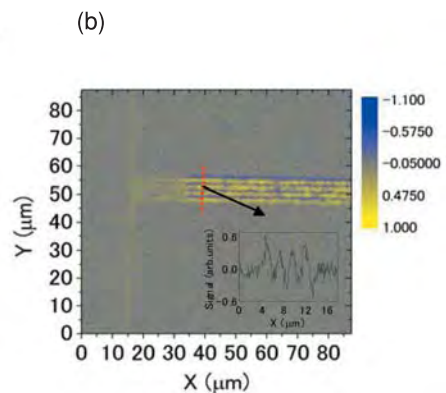
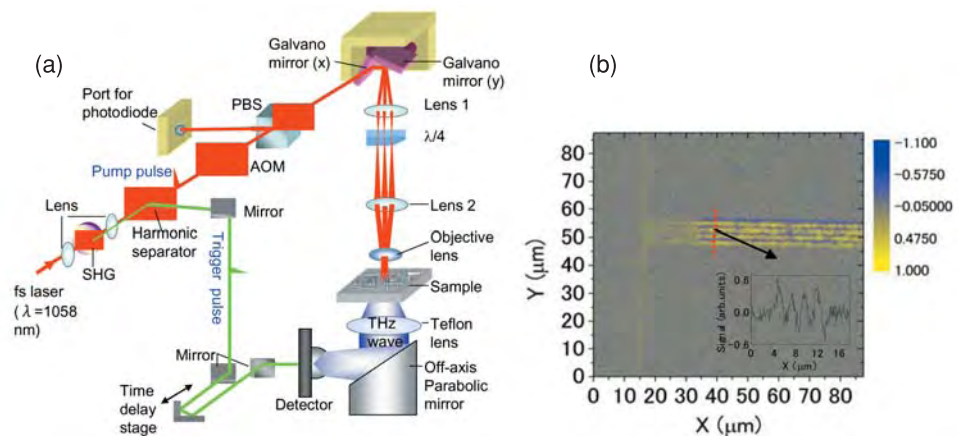


図4 (a)LTEMの構成図。(b)0.6μmラインアンドスペースのLTEM像。

<レーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発>

テラヘルツ波応用システムの開発の一つとして、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡(Laser Teraheartz Emission Microscope:LTEM)の開発を行っている。LTEMは様々な材料にフェムト秒レーザーを照射することで、励起領域からテラヘルツ波が発生することを利用して、汎用的顕微鏡を構成するもので、電荷のダイナミックな動きをとらえることを特徴とするものである。分解能はレーザービーム径で決まるため、最終的にはナノスケールの分解能まで期待できる。本研究では、分解能を上げるため、固浸レンズを用い¹¹⁾、高速化イメージング技術として、ガルバノミラーを採用した。システムの構成を図に示す。ラインアンドスペースを用いて評価した分解能は、図に示すように、0.6μm像が明瞭に観察されており、それ以上の分解能を達成している。

LTEMは、様々な応用への展開が期待できる。応用の例として、強誘電ドメインの観測や、LSI不良個所特定装置への応用が期待されている^{12,13)}。今後は、開発したLTEMを用いて、デバイスのダイナミックな動作観測や、様々な電子材料評価に適用を進める予定である。

まとめ

本研究では、その基盤を形成するものとして、新機能性電子材料の光テラヘルツ波機能の創製、テラヘルツ機能性デバイスの開発、並びに、テラヘルツ応用システムの開発に取り組んでいる。その中で、BFO材料からのテラヘルツ波発生の発見と機構解明、光アシスト分極反転効果の発見、NCMOからのテラヘルツ波発生スピン状態依存性の観測など様々な、光・テラヘルツ波機能の発見とその機能解明に成功した。また、高温超伝導体ジョセフソン接合による、フェムト秒レーザー励起テラヘルツ電磁パルスの計測を世界に先駆けて取り組み、その特性を評価した。また、テラヘルツクロックまで対応が可能な、光応答・演算素子の試作に成功した。テラヘルツ応用システム開発の一つとして、DAST結晶を用いたテラヘルツ時間領域分光装置の開発に取り組み、企業との共同研究で製品化に成功した。世界オリジナルである、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発にも取り組み、分解能0.6μmを達成し、そのLSI不良個所特定装置への応用や電子材料の局所ダイナミック物性評価への応用を開始した。

参考文献

[1] 斗内, "テラヘルツ技術", オーム社, 2006年5月
 [2] M.Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", Nature Photonics 1, 97 - 105, 2007
 [3] 斗内, "テラヘルツ波技術が拓く新産業—その課題と展望—", 光学38, 64-71, 2009
 [4] D.S. Rana, et. al., "Understanding the nature of ultrafast polarization dynamics of ferroelectric memory in the multiferroic BiFeO₃", ADVANCED MATERIALS 2009 (in press);
 [5] D.S. Rana, et. al., "Implications of Phase-Segregation on Structure, Terahertz Emission and Magnetization of Bi(Fe_{1-x}Mn_x)O₃ (0 ≤ x ≤ 0.5) Thin Films", EPL 2009(in press);
 [6] K.R. Mavani et. al., "Effects of disorder and scaling of optical conductivity in Nd_{0.5}Ca_{0.5-x}Ba_xMnO₃ (x=0 and 0.02) thin films as observed by terahertz time-domain spectroscopy". APL 93, 231908, 2008;
 [7] K. R. Mavani, et. al., "Effects of cation disorder on terahertz emission from half-doped manganite thin films", EPL 81, 17009, 2008
 [8] 斗内, "BiFeO₃薄膜からのテラヘルツ波発生と光新機能", マテリアルインテグレーション第22巻第2号 2009(印刷中)
 [9] K. Takahashi et. al., "Terahertz radiation by an ultrafast spontaneous polarization modulation of multiferroic BiFeO₃ thin films", PRL 96, 117402, 2006
 [10] 斗内, "DAST結晶のテラヘルツ光源応用", オプトロニクス No.11, 171-177, 2008
 [11] S. Kim, et. al., "Transmission-type laser THz emission microscope using a solid immersion lens", IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. 14, 498-504, 2008
 [12] D. S. Rana, et. al., "Visualization of photoassisted polarization switching and its consequences in BiFeO₃ thin films probed by terahertz radiation", APL 91, 031909, 2007.
 [13] M. Yamasita, et. al., "Noncontact inspection technique for electrical failures in semiconductor devices using a laser terahertz emission microscope", APL 93, 041117, 2008.