

電子材料からのテラヘルツ電磁波励起と機能デバイス応用に関する研究 (0213010)

Studies on Terahertz Excitation of Electronic Materials and Application for Functional Devices

研究代表者

斗内政吉 大阪大学

Masayoshi Tonouchi Osaka University

研究分担者

村上博成[†] 川山巖[†] 高橋宏平[†]、内田直次[†]、紀和利彦^{††}、山下将嗣^{†††}

Hironaru Murakami[†] Iwao Kawayama[†] Kouhei Takahashi[†] Naotsugu Uchida[†] Toshihiko Kiwa^{††}

Masatsugu Yamashita^{†††}

[†]大阪大学、^{††}岡山大学、^{†††}理化学研究所

[†]Osaka University ^{††}Okayama University ^{†††}RIKEN

研究期間 平成 14 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

本研究では、様々な電子材料からのテラヘルツ電磁波放射を観測し、高機能テラヘルツ波発生デバイスの開発、ならびにその応用分野の開拓を図ることを目的とした。電子材料としては、従来から研究されてきた半導体や低温成長 GaAs に加えて、高温超伝導体・マンガン酸化物などを代表とする強相関電子系材料、非晶質半導体、多重量子井戸構造など様々な物質を対象とし、フェムト秒レーザー励起によるテラヘルツ波発生機構、テラヘルツ帯電荷物性ならびに高速電荷ダイナミクスを科学することから、新しい機能デバイスの開発を行った。

Abstract

In this project, radiation properties of terahertz electromagnetic waves from many kinds of electronic materials, e.g. high- T_c superconductors, colossal magnetoresistive materials, amorphous semiconductors and quantum well structure, in addition to conventional materials for terahertz emitters were investigated and various functional terahertz devices were proposed and demonstrated to exploit novel applications in this field. At the same time photomixing system with superconducting detector was developed for new cw terahertz application.

1. まえがき

光と電波の間には、これまで利用が困難であった未開拓領域“テラヘルツ”帯が存在する。テラヘルツ帯は、電子デバイスの動作上限周波数に近く、良質の信号源や光源がなく、また、水の吸収が大きく影響するなど、利用に大きな障害があり、電波天文など宇宙の観測、フーリエ・ラマン分光など、特殊な計測・分析分野に限られていた。しかし今、科学技術の発展に伴い、光を用いた電荷の制御を利用したレーザー励起テラヘルツ電磁波放射とその応用が注目を集め、テラヘルツ帯利用への道が開かれつつある。レーザー励起テラヘルツ電磁波とは、例えば、高電界下におかれた半導体中において、光により電子を励起し、その走行に伴う光電流の時間変化を利用して、極短電磁パルスを空間に放射するもので、その電磁パルスの周波数成分が数 10GHz から数 100THz を含む。その様な技術は、新しいセンシング機能を提供し、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなど様々な分野における応用が見込まれており、また、テラヘルツ帯には、固体、生体、バイオ試料に関する興味深い物性も存在し、サイエンスの宝庫である。応用が期待されるテラヘルツ研究分野であるが、まだ、同分野の開拓が始まったばかりであり、取り組むべき課題も多い。例えば、テラヘルツ光源の高出力化や情報通信との融合に向けたデバイス開発、ならびに様々な応用の提案と実施例の積み重ねなどである。テラヘルツ光源として、低温成長ガリウム砒素(LT-GaAs)や半導体ウェファを用いた光源開発が行われてきたが、その他の探索例は少ない。また、応用の主たる目的は分光・イメージングであり、情報通信との融合や情報通信関連研究への応用は皆無であり、新しい応用展開も重要である。本研究では、その様な課題に対して、テラヘルツ波デバイス電子材料に関しての探索的研究、ならびに新しい応用提

案とその実現を目指した。

具体的には1)高効率・高機能光テラヘルツ波変換材料の探索的研究、2)テラヘルツ波機能電荷物性の解明、3)フォトミキサー／ジョセフソン接合ハイブリッドシステムの構築の3課題を中心に取組んだ。それらの周辺技術や、研究成果の派生的な展開を含めるとその成果は多岐にわたり、テラヘルツ波研究に関する学際的・工学応用的分野全般への貢献が出来たと考える。

2. 研究内容及び成果

2.1 高効率・高機能光テラヘルツ波変換材料の探索的研究

様々な電子材料(LT-GaAs、半絶縁性(SI-)GaAs、SI-InP、p型InAs、鉄イオン注入(Fe-)InGaAs、InAs 量子井戸、非晶質(a-)Ge、YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (BSCCO)、Tl₂Ba₂CaCu₂O_{8+δ} (TBCCO)、Y_{1-x}Pr_xBa₂Cu₃O_{7-δ} (YPBCO)、Pr_{1-x}CaxMnO₃ (PCMO)、La_{1.4}Sr_{1.6}Mn₂O₇ (LSMO327)、BiFeO₃)を用いて光スイッチを作製し、そのテラヘルツ波発生・検出機能を調査・検討した。この研究において、高温超伝導体(BSCCO, YBCO, TBCCO)のテラヘルツ波発生効率のキャリア密度依存性、Mn 酸化物の磁気・電荷秩序のテラヘルツ波発生への影響および低温化におけるテラヘルツ波発生素子としての a-Ge の有用性などが明らかにされた。また、本研究における最重要課題のひとつである光通信帯波長 1.55μm 光源を用いたテラヘルツ波発生・検出において大きな進歩が見られた。本研究では、InGaAs を用い、Fe イオンを注入することで、1.55μm 光源を用いた光スイッチによるテラヘルツ波の発生・検出に成功した(図 1)。さらに、抵抗が低くバイアス電界を大きく出来ないため、InGaAs のテラヘルツ波発生効率を挙げることは困難であった。しかしながら本

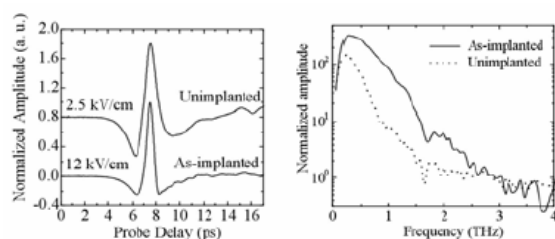


図 1 イオン注入によるテラヘルツ波放射波形とそのスペクトルの変化

研究において、光スイッチの形状を最適化することにより、これまでの数倍の放射強度を持つ光スイッチの開発に成功した。

2.2 テラヘルツ波機能電荷物性の解明

極短パルスレーザー照射により発生するテラヘルツ電磁波は、電荷の高速ダイナミクスに関する情報を多く含んでいる。特に、時間領域で実際の実空間電荷移動に伴う情報が得られるという点で非常に有用である。本研究では、低温ステージテラヘルツ電磁波励起観測システムを用い、様々な電子材料における、テラヘルツ帯電荷物性ならびに超高速電荷ダイナミクスを分析・検討した。前項目で挙げた電子材料のほか、誘電体・強誘電体材料などについても、今後テラヘルツ波機能制御に応用できる可能性があると考え、 SrTiO_3 、 $\text{BaSr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 、 BaTiO_3 、 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ などの特性も計測した。本研究により、高温超伝導体からのテラヘルツ波放射帯域とジョセフソンプラズマ共鳴周波数との相関、強誘電体によるテラヘルツ波強度のチューニング、LT-GaAs や SI-GaAs 中に励起された光キャリアの散乱過程など、多くの興味深い結果が得られている。特に注目すべきは内容として、マルチフェロイック材料 BiFeO_3 からのテラヘルツ放射特性が挙げられる。強誘電体の自発分極により、外部からのバイアス電界なしでテラヘルツが発生することを発見したもので、基礎応用の両面から非常に高く評価されている(図 2)。

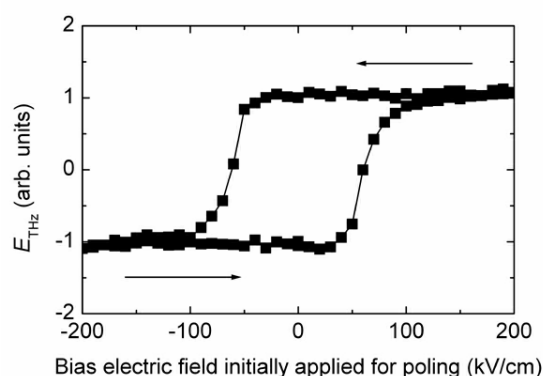


図 2 ゼロバイアス下において BiFeO_3 薄膜から放射されるテラヘルツ波振幅のポーリング電圧依存性

2.3 フォトミキサー／ジョセフソン接合ハイブリッドシステムの構築

各種光スイッチを用いてフォトミキシングによるテラヘルツ波を発生し、高温超伝導ジョセフソン接合による検出を試みた。これは次世代の情報通信技術に貢献する新しい応用の提案である。本研究において、上記システムがレーザー波長計測装置に利用可能であることを証明した(特許申請済み)。また、フォトミキサーとコプレーナ型 YBCO 導波路ならびにジョセ

フソン接合を組み合わせた一体型フォトミキシング/ジョセフソンハイブリッドシステムにおいて 95GHz までの動作確認に成功した。さらに単一走行キャリアフォトダイオードを用いたフォトミキシング電磁波の発生と高温ジョセフソン接合による検出システムを構築し、60-160GHz の空間伝送が可能である事を実証した。また、光スイッチに LT-GaAs フォトスイッチを用いることにより、225GHz までの電磁波発生・検出に成功した。

2.4 その他派生的な研究

種々の電子材料からのテラヘルツ波発生・検出システムに、従来の光学系に代わり光ファイバーを導入した。これにより、テラヘルツ波光源および検出器の駆動が容易になり、様々な機能を持つイメージングシステムの構築が可能となった。この様な技術を基盤として、光ファイバプローブを用いた高分解能走査型テラヘルツ放射顕微鏡、およびテラヘルツ角度・時間分解分光システムを開発した。これらのシステムは、材料物性研究およびデバイス検査などに非常に有効であり、基礎研究のみならず産業界からも大きな注目を集めている。

また、高温超伝導体ジョセフソン接合アレイを用いた光入力素子開発において、光パルス、電流および磁場など様々な外場によって入力信号を変調することに成功し、超高速・超低消費電力で動作する機能性光演算素子としての可能性を示した。

3. むすび

本プロジェクトにおいては得られた成果は、テラヘルツ波を用いた計測・分析、電子デバイス等の基盤技術となり、医療・バイオから情報通信まで大きな波及効果が見込まれる。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Takahashi, N. Kida, and M. Tonouchi, "Terahertz Radiation by an Ultrafast Spontaneous Polarization Modulation of Multiferroic BiFeO_3 Thin Films", *Phys. Rev. Lett.* Vol. 96, Art.no.117402 (March 22, 2006)
- [2] M. Suzuki, M. Tonouchi, "Fe-implanted InGaAs terahertz emitters for 1.56 μm wavelength excitation optical pulses", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.86, Art.no.051104 (January 27, 2005)
- [3] 斗内政吉, "テラヘルツ波技術の現状と展望", *応用物理* Vol.75 No.2 pp160-170 (2006 年 2 月)

【申請特許リスト】

- [1] 斗内政吉、鈴木正人、光スイッチ、日本、2004 年 9 月 14 日
- [2] 斗内政吉、高橋宏平、光電磁波変換素子、日本、2005 年 8 月 11 日
- [3] 斗内政吉、川山 巖、堂田泰史、光入力素子、日本、平成 18 年 8 月 23 日

【受賞リスト】

- [1] 紀和利彦(共同研究者、斗内政吉)、第 16 回 (2004 年春季) 応用物理学会講演奨励賞、「ジョセフソン接合を用いたフォトミキシング電磁波周波数検出・安定化システム」、平成 16 年 9 月
- [2] 小林猛、斗内政吉、第 26 回応用物理学会論文賞 (解説論文賞)、「高温超伝導エレクトロニクスの最近の動向」、平成 16 年 9 月
- [3] Y. Doda (共同研究者 I. Kawayama, H. Murakami, M. Tonouchi), Best Poster Award at 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (NVLS2006), "Optical response of Josephson vortex flow transistors", Dec. 13, 2006