

光通信技術に適合したテラヘルツ波センシングシステムの開発 (032207004)

Advanced Terahertz Technologies adapted for Optical Communication

研究代表者

田中耕一郎 京都大学大学院理学研究科

Koichiro Tanaka, Department of Physics, Kyoto University

研究分担者

永井正也[†] 角屋 豊^{††} 北川二郎^{††} 大竹秀幸^{†††} 杉浦利治^{†††}

福島一城^{††††} 深澤亮一^{††††} 斎藤伸吾^{†††††}

Masaya Nagai[†] Yutaka Kadoya^{††} Jiro Kitagawa^{††} Hideyuki Ohtake^{†††} Yoshiharu Sugiura^{†††}

Kazushiro Fukushima^{††††} Ryoichi Fukasawa^{††††} Shingo Saito^{†††††}

研究期間 平成 15 年度～平成 19 年度

本研究開発の概要

光通信帯域の超小型フェムト秒ファイバーレーザーと超高速フォトデバイスをもちいたテラヘルツ波発生・検出技術を進展させ、医薬・生物分野での応用に適した全反射分光 (ATR) ヘッドを内蔵した小型テラヘルツセンシングシステムを開発した。1.5 μ 帯のテラヘルツ波発生・検出に関しては、非線形結晶または低温成長 InGaAs および低温成長 GaAs 光電導アンテナをもちいた 2 つの方式で開発を進め、実用化の目処をつけた。さらに、全反射分光技術やテラヘルツ分光チップ、広帯域テラヘルツ波発生・検出技術、シングルショット検出技術、高出力ファイバーレーザー技術などの要素技術の開発もすすめ、一部を実用化すると共に、新しい分光アプリケーションの開拓に取り組んだ。これ等の新しい技術により学術的な新しい発見が物理・化学・生物の分野で期待されると共に、バイオ関連物質の高感度検出による医療応用、機能性材料評価による産業応用、安全な社会のためのセキュリティへの応用が加速される。

Abstract

We have developed a compact Terahertz-analytical sensing system with an ATR (Attenuated Total Reflection Spectroscopy) head suitable for biomedical applications, utilizing a small fiber-based femtosecond laser system and novel THz-generation and detection technologies adapted for the optical telecommunication. We succeed in generating and detecting the terahertz wave using 1.5 mm femtosecond lasers with non-linear optical generation techniques and/or with antenna devices using LT-InGaAs and LT-GaAs. In addition, there have been developed novel techniques such as a high power femtosecond fiber laser, a sophisticated ATR, a spectroscopic THz-chip, broadband oriented technologies and a single-shot detection technique. These technologies will lead to new findings in the basic research field and also open wide applications in biomedical detection, material analysis for high frequency radio communication and security devices for safety society.

1. まえがき

コンパクトなテラヘルツ分光装置の開発は生産現場での使用を考えた場合に必須であり、小型化により価格の低下も見込める。小型化を達成するために、我々は 1.5 ミクロン帯のフェムト秒レーザーの使用を決めた。これにより、光ファイバーを中心とした様々な光通信帯域で開発されているデバイスの利用が可能となる。本プロジェクトでは、コンパクトなテラヘルツ分光装置ばかりでなく、分光を高感度でフレキシブルに行うための分光ヘッドの開発にも取り組み、ATR ヘッドや分光チップの改良に成功した。さらにレーザーの高出力化や広帯域化など、全体としてのパフォーマンスを高いレベルに持っていくことに成功している。

2. 研究内容及び成果

以下、各項目別に本プロジェクトの代表的な成果の一部を簡単にまとめる。

<コンパクトテラヘルツセンシングシステム>

800nm と 1500nm のフェムト秒レーザーをもちいたコンパクトテラヘルツセンシングシステムの開発に成功した。図1に示すように、光源部、測定部、回路部の3つの部分から構成されており、光源部と測定部は光ファイバーで結合され、遠隔地での計測が可能である。測定部には全反射検出ユニットをもちいて粉末試料や液体試料を簡便に測定することが可能になっている。本システムには、



図1 コンパクトTHzセンシングシステム

ATRばかりでなく、ファイバー入力など光通信技術や 1500nm 帯域でのテラヘルツ波発生/検出技術など、本プロジェクトで新たに開発された技術が採用されており、センシングシステムに要求される基本的性能をほぼ満たしていることを確認済みである。今後、当開発技術の製品化、産業化が課題となる。

<ファイバーレーザーの高性能化>

1 ミクロン帯においてパルスエネルギーとして 10 マイクロジュール、平均出力 1W のレーザーの開発に成功した。これまでの同等性能のチタンサファイアレーザーに比べて、数分の 1 以下のサイズに収めることができた。本レーザーは THz イメージングや高速 THz センシングに十分使えるレーザーとなる。

<赤外域でのテラヘルツ発生・検出に適した半導体デバイスの作製とその評価>

低温成長バルク InGaAs を用いた光伝導アンテナを作製し、1.56 mm 帯ファイバーレーザー光のみを用いた THz 波発生・検出に成功した。さらに、PIN 型フォトダイオードによるテラヘルツ波発生、低温成長 GaAs を用いたテラヘルツ波検出をおこない、低温成長バルク InGaAs を用いた光伝導アンテナと同等もしくはそれ以上の性能を得ることに成功した。その結果、PIN フォトダイオードを発生に、低温成長 GaAs 光伝導アンテナを検出に用いることで、商用的に入手可能な素子のみを組み合わせて、1.5 μm 帯パルス光を光源とするテラヘルツシステムが構築可能であることが明らかになった。

<テラヘルツ分光チップの開発>

半導体基板上にテラヘルツ発生部、導波路／検出部、テラヘルツ検出部を集積したテラヘルツ分光チップの開発に成功した。分光チップでも複素光学定数の絶対値を得ることが可能であることを明らかにした。さらに、低誘電率プラスチック（シクロオレフィン）基板を用いたコプレーナストリップ（CPS）線路型分光チップを開発し、粉末試料の分光測定を行った。シクロオレフィン基板上 CPS 型分光チップを用いると今までの伝送線路型分光チップより広帯域測定が可能であることを明らかにした（図 2）。今後、医療応用など特殊目的にはこのような分光チップが有利であると考えられる。

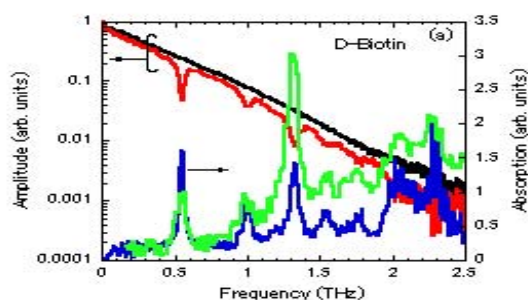


図 2 テラヘルツ分光チップによる広帯域計測

<テラヘルツ波の高出力化の研究>

当初目標にはなかったが、非線形結晶をもちいて非同軸光励起による高強度テラヘルツ波発生技術を試みた。誘電体結晶である LiNbO₃ などはワイドギャップであることから 2 光子吸収が生じにくく、また電気光学定数が大きいために高強度のテラヘルツ波発生が期待できる。光パルスの波束面を空間的に制御することで、効率よくテラヘルツ光が増幅することに成功した。この発生過程を非同軸パラメトリック過程と考えて発生方法の最適化を行い、0.5 μJ の広帯域テラヘルツ光パルスの生成に成功した。これは従来の出力のほぼ 3 ケタ上のものであり大きな進展である。

<ATR 法の広帯域化と分光応用の多様化>

全反射減衰分光法 ATR 法がさまざまな物質系を測定する上で有用であることを示した。半導体、絶縁体、誘電体、粉体試料、液体、水溶液などを測定し、スペクトルの起源を議論した。特に、水あるいは水を含む生体関連物質

の測定においては、これまでの測定可能周波数領域を拡大し、0.2 から 3.5 THz にわたる広い周波数領域で、水の誘電応答を測定することを可能にした。その結果、水や低級アルコールのテラヘルツ領域の誘電応答、水和現象に関して新しい知見を見出すことに成功した。

3. むすび

5 年間のプロジェクトで分光装置の小型化に関わる様々な技術開発をおこない、高感度に簡便な方法で測定可能なシステムを開発した。当初の目的はほぼ達成したものと考えている。これまで、サポートしていただいた SCOPE 関係者に深く御礼申し上げる。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Hirori, K. Yamashita, M. Nagai, and K. Tanaka, "Attenuated total reflection spectroscopy in a time domain using terahertz coherent pulses", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, (10A), L1287-L1289 (2004).
- [2] M. Nagai, K. Tanaka, H. Ohtake, T. Bessho, T. Sugiura, T. Hirosumi, and M. Yoshida, "Generation and detection of terahertz radiation by electro-optical process in GaAs using 1.56 mm fiber laser pulses", Appl. Phys. Lett., Vol.85, (18), 3974 (2004).
- [3] Shinji Yanagi, Masayuki Onuma, Jiro Kitagawa, and Yutaka Kadoya, "Propagation of Terahertz Pulses on Coplanar Strip-lines on Low Permittivity Substrates and a Spectroscopy Application", Applied Physics Express, 1, .012009 (2008).

【申請特許リスト】

- [1] 田中耕一郎、永井正也、角屋豊、大竹秀幸、杉浦利治、別所俊明、“テラヘルツ波発生用半導体結晶、その結晶を用いたテラヘルツ波発生装置とその方法及びテラヘルツ波検出装置とその方法”、日本、2004-149576、特許公開 未公開 PCT 出願済
- [2] 齋藤伸吾、中山正昭、溝口幸司、赤羽浩一、山本直克、阪井清美、半導体量子構造中のコヒーレントフォノンによるテラヘルツ波の放射の電場による増強、日本、2006/8/28
- [3] 大竹秀幸、“テラヘルツ波発生装置及びテラヘルツ波検出器”、日本、出願番号 2007-127033、出願日 07/05/11

【登録特許リスト】

- [1] 大竹秀幸、吉田 睦、田中 耕一郎、永井 正也 “反射型テラヘルツ分光測定装置及び測定方法”、日本、特許番号 03950818

【受賞リスト】

- [1] アイシン精機株式会社、グッドデザイン賞、“フェムトライト”、2004

【報道発表リスト】

- [1] “テラヘルツ電磁波を発生”、読売新聞、2005/11/6
- [2] “テラヘルツ光で検査”、日本経済産業新聞 2006/4/25, 1 面記事として)
- [3] “テラヘルツ波 応用広がる”、日本経済新聞 2006/10/8)

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/project/index.html>