

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686018

研究課題名(和文)超短パルス電子ビームを用いたリアルタイム2Dテラヘルツ分光システムの開発

研究課題名(英文)Development of real-time 2D THz spectroscopy using ultra-short electron beam

研究代表者

黒田 隆之助(KURODA, RYUNOSUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：70350428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は小型加速器ベースの高出力テラヘルツ光源を開発し、その高出力テラヘルツパルスによる時間領域分光法を確立させ、将来のリアルタイム2Dスペクトル計測システムの実現を目指すものである。高出力のコヒーレント遷移放射テラヘルツ放射光(THz-CTR)を用いたマルチショット時間領域分光では、ZnTe結晶とフェムト秒プローブパルスを用いたEOサンプリング法により、0.1～2THz程度の範囲でのスペクトル測定に成功した。シングルショット分光では、チャープパルスプローブ光を最適化することにより約15fsの時間分解能での計測システム、そして将来のリアルタイム2Dスペクトル計測への目途を立てることができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed the high-power THz time-domain spectroscopy using the high-power THz source on the basis of the compact electron linac. The high-power THz wave has been generated using coherent transition radiation (CTR) with polarization control for THz time domain spectroscopy (THz-TDS) with the S-band compact linac at AIST. The THz-CTR-TDS System has been constructed with EO sampling method. As a result, the THz temporal waveform has been successfully measured with this system. In near future, we will perform the single-shot measurement with a chirped probe laser in order to improve the stability of this system and to extend the measured spectral range.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：テラヘルツ 光源技術 分光技術 加速器技術 高性能レーザー 超短パルス電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

光と電波の境界領域、テラヘルツ(THz)領域(0.1~10 THz)は、分子の回転・振動の周波数に相当し、物質の指紋スペクトルが存在するため、世界各国でテラヘルツ時間領域分光法(THz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)等の研究が進められている。THz-TDSは、THzパルスサンプルに入射させ、透過後のTHzパルス波形をポンププローブ法により測定し、フーリエ変換することで周波数ごとのサンプルの吸収スペクトルや、位相情報を得る分光法で、スペクトル情報だけでなく物質の複素屈折率、複素誘電率、複素伝導率などを求めることができる。その応用の可能性は、材料分析、ライフサイエンス、医用分野など多岐にわたっており、特にテラヘルツ帯には、禁止薬物や爆薬などの指紋スペクトルが存在することから、セキュリティ分野での活躍が期待されている。しかしながら、既に市販されている従来型のレーザーベースTHz光源では、フェムト秒レーザーを半導体光伝導アンテナなどに照射することでTHzパルスを得ているが、そのピーク強度はたかだか数mW程度と大変弱い。その微弱な光を分光分析などに使用するため長時間測定を要するだけでなく、特に薬物サンプルにおいては、これまで粒径の細かな粉状サンプルのみの測定しかできなく、錠剤や内包カプセルはもちろん、バルク結晶の測定すら困難であった。

一方、超短パルス電子ビームによる放射光は、そのパルス長より長い波長の光は、コヒーレント放射光となり、その強度はパルス内の電子数の2乗に比例して強くなる。産業技術総合研究所のSバンド小型電子リニアックでは、最大40MeVのエネルギーの超短パルス電子ビームを生成し、コヒーレント放射技術を利用した小型加速器ベースの高出力テラヘルツ光源の開発を行ってきた[R. Kuroda et al., Infrared Phys. Tech. 51-5, 390, 2008]。ピーク出力としては、数kW~数10kWといった極めて高いピーク強度のコヒーレントTHz光生成が可能である。インコヒーレント放射強度を1とすると、テラヘルツ領域のコヒーレント放射は、電子の個数分、 $10^9 \sim 10^{10}$ 倍に増大した強度が得られる。そこで、本研究では、上記の小型加速器ベースの高出力テラヘルツ光源を用いたあらたなテラヘルツ分光技術により、サンプル形状に依存しない分光計測を実現するための課題を提案するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、小型加速器ベースの高出力テラヘルツ光源を開発し、高出力テラヘルツパルスと超短パルスプローブレーザーを用いたテラヘルツ時間領域分光を行うと同時に、リアルタイムでの2Dスペクトル計測を実現を目指すため、チャープパルスプローブレーザーを用いたシングルショット分光を開

発することを目的としている。それにより、大気中における実環境下での、爆薬・麻薬等の禁止薬物(実際のサンプルは模擬サンプル)に対して、テラヘルツ分光計測を行い、サンプル形状に依存しない分光スペクトル測定法の実現を目指す。

3. 研究の方法

高出力のテラヘルツ光源開発のため、産業技術総合研究所Sバンド小型リニアック施設を用いた超短パルス電子ビーム生成を行う。Sバンド小型リニアック施設では、約10m×10mの1つの中規模実験室に、電子源、加速管、電磁石、マイクロ波源、光源レーザー装置等全てのコンポーネントを設置している。コヒーレント・テラヘルツ放射光生成のための電子ビームは、まずCs-TeレーザーフォトカソードRF電子銃とUVレーザーによって、1nC、約4MeVの電子ビームを生成し、1.5mの $\sqrt{2}$ モード定在波加速管(APS型)2本で最大42MeVまで加速する。加速した電子ビームは、アクロマティックアーク部(2個の偏向電磁石と4個の四極電磁石)によって、磁気パルス圧縮により1ps以下の超短パルス電子ビームに圧縮している。テラヘルツ領域のコヒーレント放射光の生成は、真空チャンバーに、アルミナ板やアルミ板等のターゲットを挿入し、上記超短パルス電子ビームを集光照射することでコヒーレント遷移放射光(CTR)を生成している。ターゲットを45度傾けることで、放射をビーム軸から垂直方向に取り出し、テラヘルツ光学系を用いたテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)への適用を行った。

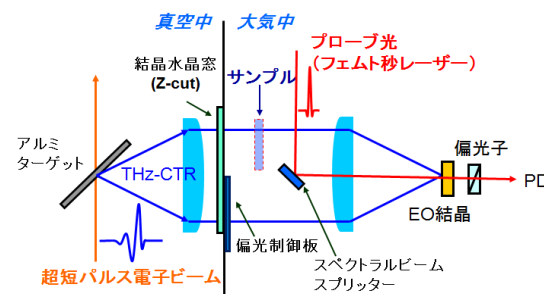


図1: 超短パルス電子ビームを用いたEOサンプリング法によるTHz-CTR-TDSシステム

コヒーレント遷移放射光(CTR)では、光源点が電子ビーム集光点となることから、数10 μm の点光源と見なすことができ、テラヘルツ光学系を構築しやすいことが利点である。THz-TDSでは、図1のようにTHz-CTRをテラヘルツレンズによって平行光にし、z-cut結晶水晶窓から平行ビームとして大気中に取り出している。そして、取り出した平行ビームのテラヘルツパルスを、サンプル透過後に、再度レンズによ

てEO結晶に集光する。同時に、プローブ光をEO結晶に集光させ、EOサンプリング法によりテラヘルツパルス の時間波形を取得するシステムである。このEOサンプリング法によりテラヘルツパルス の時間波形を計測し、フーリエ変換によりスペクトルが得られるが、サンプルの有無によってその差分を取ることで、サンプルのTHz領域の吸収スペクトルが測定できる。

4. 研究成果

コヒーレントTHz遷移放射による時間領域分光システム(THz-CTR-TDS)の光源として、コヒーレント遷移放射によるTHz波を用いた。産総研では1ps以下の短パッチの電子バンチを100um以下のターゲット板を通過させ、CTRを生じさせている。図2に遷移放射の概念図を示す。

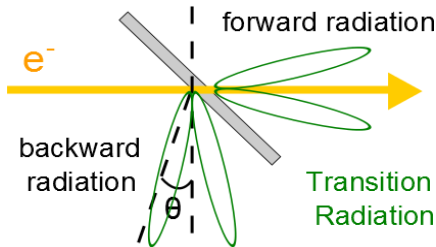


図2：遷移放射の概念図

ターゲットとなるアルミ板やアルミナ板はビームの進行方向に対して45度の角度となるように設置しており、本実験では後方放射のCTRをz-cut単結晶水晶窓を通過させ大気に取り出した。この遷移放射の放射強度は次式によって与えられ、電子バンチのエネルギー40MeVの場合の遷移放射の角度分布は図3のように計算される。ここで、eは電子の電荷量、は真空の誘電率、cは光の速度、は相対速度である。

$$I_{tr}(\theta) = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2}$$

遷移放射は1/の広がりを持ち、40MeVの電子バンチの場合は約12.5mradと計算される。

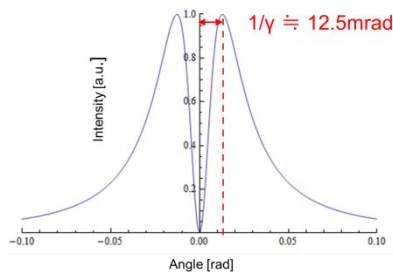


図3：遷移放射の角度依存性

本研究では、THz-CTR-TDSで用いるEO結晶の複屈折を大きく変化させる為に、フル

エンスの高いTHz波を照射する必要があり、二枚の平凸レンズを用いてTHz-CTRを集光した。結果より、集光したTHz-CTRの焦点付近においてドーナツ形状のプロファイルが計測された。これは、遷移放射が元々ラジアル偏光であり、集光したCTRの焦点付近において、進行方向偏光(z-偏光)のTHz波となり、ショットキーダイオードでは検波できない偏光となっていた為であると考えられる。しかし、EO結晶には偏光依存性があるため、結晶内でのプローブレーザーとTHz-CTRの相互作用距離を稼ぐためには、THz-CTRはz-偏光ではなく水平偏光である必要がある。この為に、アルミニウム板によって遷移放射の半面遮光をすることで、集光したCTRの偏光制御を行った。

THz-CTR-TDSは、通常のTHz-TDS同様に、テラヘルツの時間波形を取得して、得られた波形をフーリエ変換することで周波数スペクトルを得る手法である(図4)。プローブ光をfsレーザー、ポンプ光をTHz波としたEOサンプリング法を用いてTHz波の検出を行った。EO結晶にTHz波が入射すると、THz波の持つ電場によってポッケルス効果が発生し、EO結晶に複屈折が生じる。THz波とプローブ光が同時に入射した場合、直線偏光のプローブ光は位相の変化を受け、p偏光とs偏光の強度比が変わる。従って、プローブ光に光学遅延をかけ、プローブ光の偏光の強度変化を計測することで、THz波の時間波形が観測できる。

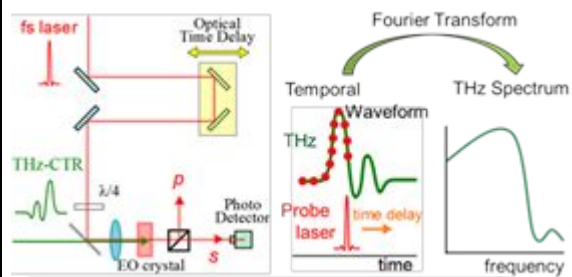


図4：THz-CTR-TDS計測手法概念図

実験のセットアップ写真を図5に示す。半面遮光にテラヘルツ波の偏光を水平偏光に制御し、集光したTHz-CTRを、結晶方位(100)、厚さ5mmのEO結晶ZnTeに入射している。

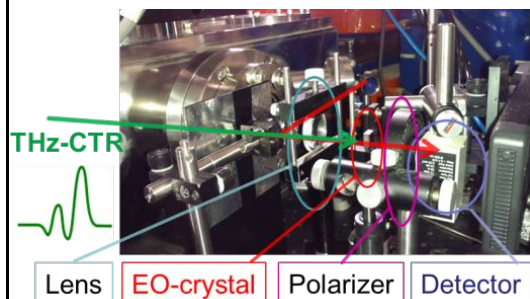


図5：THz-CTR-TDSセットアップ

図6は本実験により計測された結果であり、大気中において、EOサンプリング法を用いたTHz-CTR-TDSによりTHz-CTRの時間波形の取得に成功した。フーリエ変換後のスペクトルをサンプルの有無で比較することにより、大気中でのサンプルの吸収スペクトル測定が可能となる。

さらに、本研究において、シングルショット分光では、チャープパルスプローブ光の生成に成功し、15fsの時間分解能でのシングルショット計測へ、そしてシリンダカルレンズによる集光技術により、将来のリアルタイム2Dスペクトル計測への目途を立てることができた。

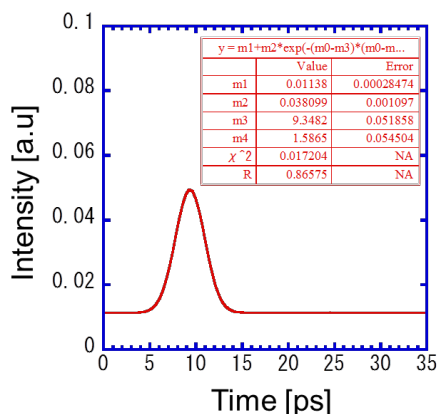


図6 : THz 時間波形(Gaussian 近似)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

"Development of a coherent THz radiation source based on the ultra-short electron beam and its applications", 黒田隆之助 他、NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCHA 637. S30-S32 (2011), 査読有

"Development of High Power THz Source using High-charge Ultra-short Electron Beam for THz Time-domain Spectroscopy and Imaging Systems", 黒田隆之助、Proceedings of TeraNano 2011 & GDR-I THz 1. 256 (2011), 査読無

"Present Status of Quantum Radiation Sources on the Basis of the S-band Compact Electron Linac", 黒田隆之助 他、Proceedings of IPAC 2012 1. 3645-3647 (2011), 査読無

“産総研 S バンド小型リニアックを用いたコヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用”, 黒田隆之助、平義隆、熊木雅史、豊川弘之、山田家和勝、Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 222-224, (2012)、査読無

“DEVELOPMENT OF A HIGH-POWER COHERENT THZ SOURCES AND THZ-TDS SYSTEM ON THE BASIS OF A COMPACT ELECTRON LINAC”, M. Kumaki, R. Kuroda, H. Toyokawa, M. Yamada, Proceedings of IPAC12, 37-39, (2012)、査読無

〔学会発表〕(計 19 件)

"Present Status of Quantum Radiation Sources on the Basis of the S-band Compact Electron Linac", 黒田隆之助 他、IPAC2011. (2011年9月8日). サンセバスチャン(スペイン)

"Development of High Power THz Source using High-charge Ultra-short Electron Beam for THz Time-domain Spectroscopy and Imaging Systems", 黒田隆之助 他、TeraNano 2011. (2011年11月28日). 大阪府大阪市

"Development of high-power THz source using ultra-short electron beam for THz time-domain spectroscopy and imaging systems", 黒田隆之助 他、TSRP2012. (2012年1月5日). ムンバイ(インド)(招待講演)

コヒーレント THz 光の発生応用、黒田隆之助、未来エネルギーシンポジウム (招待講演) 2012年7月2日、早稲田大学

Research on ICS at AIST including THz and gamma-ray application 黒田隆之助、IITB セミナー(招待講演) 2013年03月13日、IITBombay (ムンバイ)

小型加速器を用いた超短パルス電子ビームによるコヒーレント・テラヘルツ放射技術の開発と応用、黒田隆之助、AAA第31回技術部会(招待講演) 2013年4月10日、神谷町セントラルプレイス

Development of the high-power THz spectroscopy and imaging systems on the basis of an S-band compact electron linac 黒田隆之助、TSRP-2014 (招待講演) 2014年1月7日、BARC (インド)

他 12 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 隆之助 (Kuroda Ryunosuke)
産業技術総合研究所・主任研究員
研究者番号：7 0 3 5 0 4 2 8