

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760601

研究課題名（和文）

超短パルス電子ビームを用いた高出力テラヘルツ時間領域分光システムの開発

研究課題名（英文） Development of high power THz-TDS system

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・研究員

研究者番号：70350428

研究成果の概要（和文）：

本研究では、小型電子リニアック及び磁器パルス圧縮器によりパルス幅 1 ピコ秒以下の超短パルス電子ビーム（約 40MeV）を生成し、コヒーレント・シンクロトロン放射により、高出力テラヘルツ(THz)領域の放射光生成に成功した。さらに、軸はずし放物面鏡を用いて THz パルスを結晶上に集光させ、本研究における THz-TDS システム実現のための多くの知見が得られた。また、高出力の THz パルスを利用した走査型の THz イメージングに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, 40-MeV ultra-short electron beam which has bunch length of less than 1 ps has been successfully generated with a compact electron linac and a magnetic pulse compressor. The high power THz radiation has been emitted as a coherent synchrotron radiation from the ultra-short electron beam. The THz pulse has been converged to the EO crystal and some knowledge to realize this THz-TDS system has been found. Moreover, scanning THz imaging has been successfully performed using this high power THz pulse.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：テラヘルツ、超短パルス電子ビーム、コヒーレント放射、時間領域分光法

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、光と電波の境界領域にあるテラヘルツ(THz)波が注目を集めている。特に、テラヘルツ領域 0.1～3 THz (3.3～100 cm⁻¹) の周波数領域は、従来の遠赤外からミリ波にかけての電磁波領域と重なっており、未開拓

電磁波領域として、これまで産業的にあまり利用されることはなかった。レーザーベースのテラヘルツ光源は、半導体にフェムト秒レーザーを照射して、ピコ秒～サブピコ秒のテラヘルツパルスの発生や検出を行う研究が世界中で精力的に展開されている。そして、

遠赤外からミリ波にかけての電磁波技術の新しい分野が開かれている中で、テラヘルツ時間領域分光法 (THz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS) が登場してきた。その応用の可能性は、材料分析分野、食品分野、農業分野、セキュリティー分野、バイオテクノロジー分野、医用分野など多岐にわたると考えられており、今後の発展が期待されている。

(2) テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) は、THz パルスサンプルに入射させ、サンプルを透過した後の THz パルスの波形を時間分解計測し、その波形をフーリエ変換することにより周波数ごとの振幅と位相を得るという分光法である。THz-TDS では電磁波の波形そのものを計測することが特徴で、得られた振幅と位相を解析することにより、サンプルの誘電率や屈折率の周波数依存性を調べることができる。さらに誘電率の周波数依存性の解析から、サンプルの物理的・化学的な性質を探ることができる。また、サブピコ秒時間分解で超高速物理化学現象の観測も可能である。しかしながら、従来のレーザーベース THz 光源は、数 10~100MHz 程度のフェムト秒モードロックレーザーを半導体 (LT-GaAs など) に照射することにより、パルス長 1ps (ピコ秒) 程度の THz パルスを得ているが、その強度は平均出力 μ W オーダーと弱く、1パルスあたりのエネルギーは大変微弱なものである。その微弱な光を分光分析に使用するため、ロックインアンプを用いることで S/N 比を向上しているが、統計数をかなり稼ぐ必要があり、測定時間は長時間なものになってしまう欠点がある。さらに、肝心の THz 領域に吸収を多く持つ物質 (特に水を多く含む物質) の分析に対しては、分析が困難であるという致命的な欠点がある。

(3) 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。そのため、このコヒーレント放射を利用した高強度のテラヘルツ (THz) 光源を利用し、高出力テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) システムを開発することができれば、これまで測ることのできなかった物質に対する分光分析の可能性が開けると考え、本研究の着想に至った。これまでに本研究代表者は、S-band 小型電子リニアックを用いて生成し電子ビームとフェムト秒レーザーとのレーザーコンプトン散乱によるフェムト秒 X 線生成・利用研究を行っており、電子ビーム生成技術、フェムト秒レーザー技術、及び時間同期システムに関しては既に知見を有している。

2. 研究の目的

本研究は、S-band 小型電子リニアックをベースに、超短パルス電子ビームを生成し、そ

のコヒーレント放射によって高出力の THz パルスを発生させ、加速器ベースのテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) システム実現のための知見を得ることを目的とする。それにより、レーザーベースの低出力テラヘルツ光源では、これまで測りえなかった吸収の多い物質の分析や、分析時間の短縮が可能となることが期待される。

3. 研究の方法

本研究では、産業技術総合研究所の S-band 小型電子リニアックにより超短パルス電子ビームを生成し、高出力のコヒーレント放射 THz パルスによる時間領域分光 (THz-TDS) システムの開発等の応用研究を行う。その概念図を図 1 に示す。

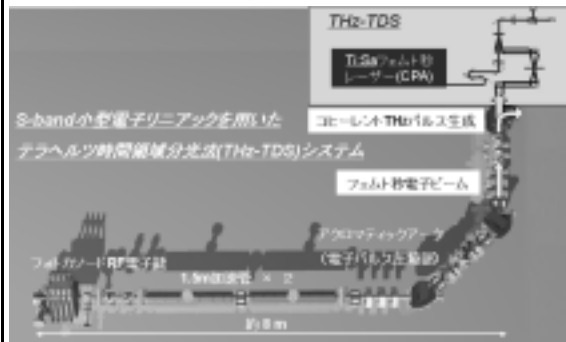


図 1 : S-band 小型電子リニアックを用いたテラヘルツ時間領域分光システム概念図

まず、S-band 小型電子リニアックにおいて、フォトカソード RF 電子銃、及び 2 本の S-band 定在波加速管を用いてエネルギー 40MeV、電荷量 1nC 以上の電子ビームを生成し、アクロマティックアーク (2 個の偏向電磁石と 4 個の四極電磁石) により 1 ps (ピコ秒) 以下のパルス長 (rms) を持つ超短パルス電子ビーム生成を行う。このリニアックは、全長 8m 程度のビームラインで、高周波源 (クライストロン) を含め、全てのコンポーネントを 1 つの中規模実験室に設置した小型加速器である。超短パルス電子ビーム生成に関して、シミュレーションでは 1 ps 以下の磁気パルス圧縮が十分可能であることは確認している。そして、生成したパルス長 1 ps 以下の超短パルス電子ビームを曲率半径 300mm の 90 度偏向磁石を用いて、電子ビームの接線方向にテラヘルツ (THz) 領域のコヒーレント・シンクロトロン放射光パルスを生成する (また、金属板や、導電性フィルムを用いたコヒーレント遷移放射光の利用も検討する)。生成したコヒーレント THz パルスは、低損失の石英窓 (z-cut) によって取り出され、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) 等の応用研究に使用する。THz-TDS 実現の知見を得るための実験として、ZnTe 等の E0 結晶とフェムト秒 Ti:Sa レーザーによる簡易的な E0 サンプリグ法による THz パルス検出を行う。尚、レーザー

ベースのTHz光源では、低出力高繰返しのTHzパルスのため、ロックインアンプ等を使用するのが一般的だが、本研究は、高出力低繰返しのTHzパルスを用いるため、フォトダイオード(PD)とオシロスコープを用いた検出が可能となる。石英窓から取り出されたコヒーレント超短THzパルスは、軸はずし放物面鏡によってサンプルに照射され、透過光は軸はずし放物面鏡によってE0結晶にポンプ光として集光される。E0結晶は、高出力THzパルスにより複屈折効果を引き起こす。フェムト秒Ti:Saレーザーは、光学遅延ステージによって時間遅延をうけ、直線偏光度を高めるための偏光子(گرانレーザプリズム, GLP)を通り、プローブ光としてTHzパルスによる複屈折効果を受けたE0結晶に照射される。複屈折光かによりレーザーパルスは円偏光成分を持ち、1/4板とGLPによってP偏光とS偏光に分離され、それぞれフォトダイオード(PD)で検出する。それらの信号比が直接、THzパルスの強度となり、ポンプ-プローブ法によりTHzパルスのパルス波形が計測できる。そして、計測したTHzパルスの時間波形をフーリエ変換することによって、スペクトルと位相情報を得ることができる。特に本研究では、0.1~1THzの領域のTHzパルス、フェムト秒Ti:Saレーザーを用いることによって、上記方法による高出力THz-TDSシステムの実現を目指した基礎、及び応用実験を行う。

4. 研究成果

本研究は、小型電子リニアックにより生成したエネルギー約40 MeVの超短パルス電子ビームを用いて、そのコヒーレント放射により高出力THzパルスを生成し、E0サンプリング法によるテラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)システムの開発を目指すものである。それにより、レーザーベースの低出力テラヘルツ光源ではこれまで測りえなかった吸収の多い物質の分析や、分析時間の短縮等が期待される。まず、S-band小型電子リニアックにおいて、S-bandフォトカソードRF電子銃、及び2本のS-band定在波加速管(1/2モードAPS構造)を用いてエネルギー40MeV、電荷量1nC以上の電子ビームを生成し、アクロマティックアーク(2個の偏向電磁石と4個の四極電磁石)により1ps(ピコ秒)以下のパルス長(rms)に圧縮することで超短パルス電子ビームを実現した。生成したパルス長1ps以下の超短パルス電子ビームを下流の90度偏向磁石を用いて、電子ビームの接続方向にテラヘルツ(THz)領域のコヒーレント・シンクロトロン放射光パルスを生成した。生成したコヒーレントTHzパルスは、低損失の石英窓(z-cut)によって取り出され、テラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)等の応用研究に使用する。次に、取り出したTHzパルスをNiコーティング、及び金コーティングの軸はず

し放物面鏡を用いて集光した。その際、集光サイズを回折限界(波長程度)まで絞るため、光源点から取出し窓までの距離を正確に計測し最適化研究を行った。その結果を図2に示す。

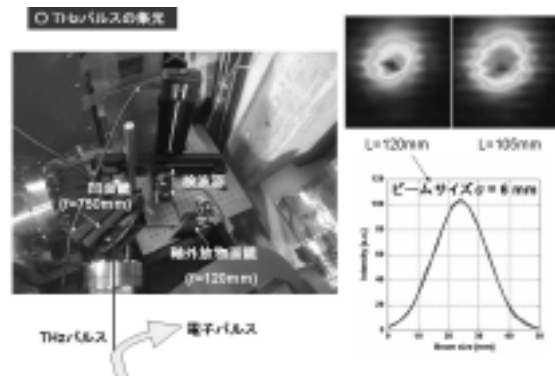


図2: テラヘルツパルスの集光

さらに、E0サンプリング法によるTHzパルス検出を行うため、THzパルスの集光点にE0結晶を配置し、THzパルスを結晶上に集光させた。同時に、図3に示すように、フェムト秒レーザーをプローブ光として結晶に集光照射するため、アライメント用のファイバーレーザーにより精密な光路調整を行い、テラヘルツパルスとプローブレーザーとのタイミング測定を行った。その結果、テラヘルツ時間波形の取得には至らなかったが、結晶上でのプローブ光とTHzパルスとの時間的・空間的オーバーラップ制御の重要性が確認され、本研究におけるシステム実現のための多くの知見が得られた。また、本研究の派生研究として高出力のTHzパルスを利用した走査型のTHzイメージングに成功したことは大きな成果であると言える。

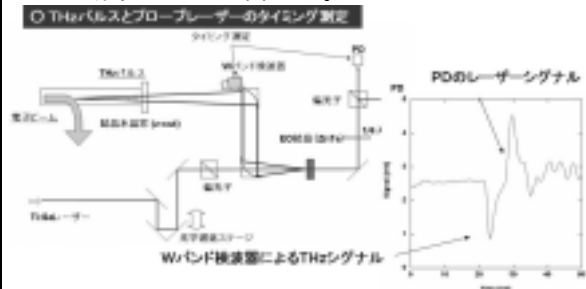


図3: テラヘルツパルスとプローブレーザーとのタイミング測定

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

黒田隆之助 他 5 名、Development of a coherent THz radiation source based on the ultra-short electron beam and its applications、Nuclear Instruments &

Methods in Physics Research Section A、査読有、2010 (in press)

黒田隆之助 他 8 名、Measurement of Coherent Terahertz Radiation for Time-Domain Spectroscopy and Imaging、Radiation Physics and Chemistry、査読有、78、2009、1102-1105

黒田隆之助 他 7 名、Development of compact THz-FEL based on Laser Photocathode RF Gun System、Proceedings of Free Electron Laser Conference '09、査読有、Vol. 1、2009、402-405

黒田隆之助 他 5 名、Development of High Power THz-TDS System Based on S-band Compact Electron Linac、Radiation Physics and Chemistry、査読有、77、2008、1131-1135

黒田隆之助 他 6 名、Generation of 0.1 THz Coherent Synchrotron Radiation with Compact S-band Linac at AIST、Infrared Physics & Technology、査読有、51-5、2008、390-393

[学会発表](計12件)

黒田隆之助、小型電子リニアックを用いた準単色X線源・テラヘルツ光源の開発と利用、第13回放射線プロセスシンポジウム、2009年11月12日、日本科学未来館

黒田隆之助、Development of a coherent THz radiation source based on the ultra-short electron beam and its applications、Ultra-short Electron & Photon Beam Techniques and Application、2009年9月8日、西安(中国)

黒田隆之助、Sバンド小型電子リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線源・コヒーレント・テラヘルツ光源の開発と応用、第6回日本加速器学会、2009年8月6日、原研東海

黒田隆之助、Sバンド小型リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線源、及びコヒーレント・テラヘルツ光源の開発と応用、第11回応用加速器関連技術研究シンポジウム(ARTA2009)、2009年6月11日、東工大

黒田隆之助、超短パルス電子ビームを用いたテラヘルツ発生と計測、第4回大阪大学ナノテクノロジーセンター研究会、2008年11月10日、大阪大学

黒田隆之助、小型加速器を用いたテラヘルツ時間領域分光システムの開発 第51回放射線化学討論会、2008年10月15日、産総研

黒田隆之助、Measurement of Coherent THz Pulse for THz Time-Domain Spectroscopy Based on S-band Compact Electron Linac、The 2nd Asia-Pacific

Symposium on Radiation Chemistry、2008年8月30日、早稲田大学

6. 研究組織

(1) 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・研究員

研究者番号：70350428