

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 26 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600148

研究課題名(和文) 超短電子ビームによる高強度ラジアル偏光テラヘルツを用いた巨視的光ピンセットの開発

研究課題名(英文) Development of the THz optical tweezer using the high-intensity radial polarized THz radiation from the ultra-short electron beam

研究代表者

黒田 隆之助 (Kuroda, Ryunosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：フォトカソードRF電子銃をベースとしたSバンド小型リニアックからの高輝度電子ビームを磁気パルス圧縮器を用いてキロアンペア級のピーク電流量まで圧縮し、ターゲットからのコヒーレント遷移放射により、ラジアル偏光テラヘルツ光を生成し観測した。直線光学系で集光し、ラジアル偏光特有のドーナツプロファイルを確認した。集光点でのテラヘルツ光ピンセット実現のため、Z軸方向の電場に感度のある微細プローブを導入し、Z軸の電場強度を概算する目途が立った。今後のテラヘルツ光ピンセットとその応用の実現が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have performed the high-brightness electron beam using the photo-cathode RF-gun based S-band compact electron linac with the magnetic pulse compressor. We have achieved the peak current electron beam up to kA order and irradiate it to the target to emit the coherent THz transition radiation and generate the radial polarization THz pulse. The THz Z-axis electric fields can be generated at the focus point. We tried to estimate the electric fields by measuring with the Z-axis THz probe to make the optical tweezer effect in the THz region. In near future, we will realize the THz optical tweezer and its applications.

研究分野：工学

キーワード：テラヘルツ 小型加速器 超短パルス電子ビーム 光ピンセット 高性能レーザー ラジアル偏光

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、世界各国で研究が進められている。しかしながら、近年のテラヘルツ光源としては、レーザーベースの低出力光源が主流であり、フェムト秒モードロックレーザーを光伝導アンテナや E0 結晶に照射することにより THz パルスを得ているが、そのピーク強度は数 mW 程度と大変弱い。産総研では、これまで、図 1 に示すように 100 フェムト秒(fs)(rms)以下級の超短パルス電子ビームを生成し、0.1~5.0 THz の周波数における高ピーク強度(kW 以上)のラジアル偏光コヒーレント THz 放射光の生成と利用研究を行ってきた。

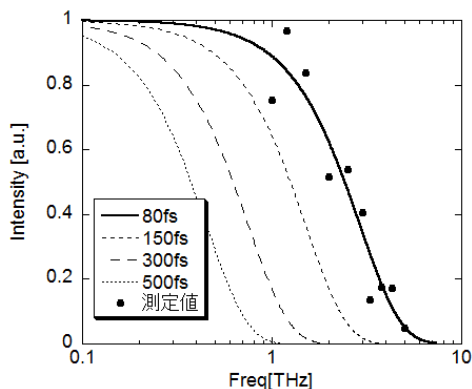


図 1: THz 光源スペクトルと電子パルス幅の関係

一方、光ピンセットは、レーザー等の光を物体に照射した際に生ずる光の放射圧を用いて、ピンセットで物体を捕捉するように細胞や粒子等をトラッピングする手法であり、非接触で μm オーダの粒子のトラッピングが可能といった特徴を持ち、近年、工学・医学・生物学など様々な分野での応用例が報告されている手法である。この光ピンセット手法は、可視光~赤外領域ではほぼ確立された技術であるが、光源の強度不足から THz 領域で実施された例は世界でもまだない状況であった。

そこで本研究により、超短パルス電子ビームからのコヒーレント THz 放射光の「ラジアル偏光」且つ「高ピーク強度」という特徴を生かすことで、未だなされていないテラヘルツ領域での光ピンセット手法を実現することができれば、上記の様々な分野において新たな分析・操作ツールとして世界に広がることが想定されるため、この実現困難な課題に対する新たな知見や指標を示すことを目指していく。

2. 研究の目的

本研究は、キロアンペア級のピーク電流値を持つ高輝度・超短パルス電子ビームを生成し、各種のコヒーレント放射(コヒーレント遷移放射等)により、単色及び広帯域のラジアル偏光テラヘルツ光を生成する。そして、上記のラジアル偏光テラヘルツ光を集光することで、焦点付近に Z 軸方向電場(Z 偏光)を形成する。

そして本研究では、この Z 軸方向のテラヘルツ電場分布の測定手法を確立させるとともに、ラジアル偏光テラヘルツを制御し、テラヘルツ光ピンセット実現するための課題抽出や実現に向けた指標を示すことを目的とし、世界でも類のない特定粒子をピックアップ可能なテラヘルツ光ピンセット・及び光クロマトグラフィを世界に先駆けて実証することを目指していく。

3. 研究の方法

産業技術総合研究所の S バンド小型電子リニアックにおいて、40MeV、1nC 以上、パルス幅 300fs(rms)以下のキロアンペア(kA)級のピーク電流値を持つ超短パルス電子ビームを生成する。この S バンド小型電子リニアックは、フォトカソード RF 電子銃と 3 m の加速管をベースとしており、エネルギー 40 MeV、電荷量 1 nC 以上の電子ビームを生成し、アクロマティックアーク部(1 対の偏向電磁石

と2対の4極磁石からなる)による磁気パルス圧縮法により、0.3 ps(ピコ秒)(=300 fs(フェムト秒))以下のパルス幅(rms)を持つ超短パルス電子ビームに圧縮する(最短は100fsまでの圧縮が可能だが、収束サイズを最適化するため300fsまでの圧縮とする)。

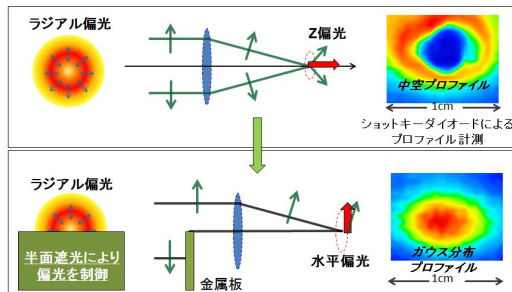


図2：ラジアル偏光と直線偏光時の集光プロフィール

ラジアル偏光テラヘルツの場合、集光点では電場が軸方向成分(Z偏光)を持っているため、光のエネルギーの流れを示すポインティング・ベクトルがゼロとなる。これまで申請者の測定例からも、図2(上)のように集光点でのプロフィールを、径方向成分に感度のあるショットキーダイオードを用いて測定すると、中空のプロフィールが測定される。このラジアル偏光テラヘルツを半面遮光することで直線偏光に制御すると、通常のガウス分布のプロフィールが測定される(図2(下))。これらの結果からも、ラジアル偏光テラヘルツの集光点では、仮にその場所に物体が存在して光を吸収したとしても、散乱力が働かないことになる。すると、光ピンセットとして機能させると電場勾配力のみが働くことになり、直線偏光を使用した場合と比べ、より効率的な光ピンセットが実現できると考えられる。

4. 研究成果

本研究では、フォトカソードRF電子銃をベースとしたSバンド小型リニアックからの高輝度電子ビームを磁気パルス圧縮器を用

いてキロアンペア級のピーク電流量まで圧縮し、ターゲットからのコヒーレント遷移放射により、ラジアル偏光テラヘルツ光を生成した。まず、ターゲットを45度傾け、電子ビームの軌道から90度方向にテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射(CTR)を発生させ、レンズにより平行光にした状態でテラヘルツ窓により大気中に取り出す。更にレンズで集光し、集光点の前後でプロフィール計測を行った。プロフィール計測は、テラヘルツ領域に感度のあるショットキーダイオードをXYスキャンすることで取得した。この結果、集光点ではラジアル偏光特有のドーナツプロフィールを確認することができた[Y. Taira et al., Vibrational Spectroscopy 75, 162, 2014]。

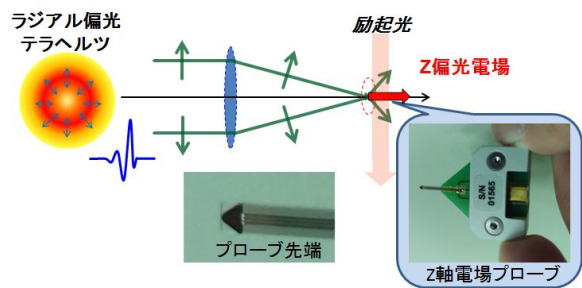


図3：テラヘルツZ軸プローブによるZ偏光テラヘルツ光電場の計測セットアップ

また、ラジアル偏光テラヘルツ光を図3のように集光することでZ偏光電場を、Z軸方向に感度のあるプローブによるZ偏光電場強度を算出することを試みた。このプローブは、特殊なアンテナ形状のLT-GaAsアンテナを光励起することにより、テラヘルツ光のZ軸電場計測を行うものである。本研究では、励起光に波長800nmのテラヘルツと同期したレーザーを用いた。その結果、微弱な信号が得られたが放射線ノイズとの分離など詳細な解析が必要であることがわかった。以上のことによりZ軸の電場強度を概算する目途が立った。今後のテラヘルツ光ピンセットとその応用の実現が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

“Observation of radially polarized terahertz radiation generated by a sub-picosecond electron beam”, Y. Taira, R. Kuroda, M. Kumaki, M. Tanaka, H. Toyokawa, *Vibrational Spectroscopy* 75, 162-168, 査読有, 2014.

〔学会発表〕(計 5 件)

“先端加速器と産業応用”, 黒田隆之助、加速器夏期セミナー、2014年8月23日、タイム株式会社、広島県三原市。

“テラヘルツ領域におけるコヒーレント遷移放射及び回折放射の偏光状態の測定”, 平義隆、黒田隆之助、田中真人、豊川弘之、富澤宏光、日本物理学会第70回年次大会、2015年3月24日、早稲田大学西早稲田キャンパス。

“加速器における実用フォトカソード電子源とその応用”, 黒田隆之助、第11回励起ナノプロセス研究会、2015年12月21日、兵庫県淡路市。

“Development of the high-power THz spectroscopy and imaging systems on the basis of an ultra-short electron linac”, R. Kuroda, APSRC-TSRP-2016 (招待講演), 2016年1月6日、ムンバイ(インド)。

“産総研Sバンド小型リニアック施設における高強度テラヘルツ波を用いた利用研究”, 黒田隆之助、平義隆、田中真人、豊川弘之、分子研研究会「高輝度・高強度赤外光源の現状と今後の展開」、2016年2月11日、愛知県岡崎市。

〔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・分析計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号：70350428

(2)研究分担者

平 義隆 (Taira Yoshitaka)
産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員
研究者番号：60635803

(3)研究分担者

豊川 弘之 (Toyokawa Hiroyuki)
産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号：80357582