

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13817

研究課題名(和文)テラヘルツ周波数の円偏光パルスによる電子線への角運動量の転写

研究課題名(英文)Transfer of angular momentum from circularly polarized terahertz pulse to electron beam

研究代表者

伊藤 宙陞(Ito, Hironori)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：60724127

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文):本研究は光によって電子の軌道を操作するという極めて基本的な物理現象を実証するものである。電子線の軌道を変化させるほどの強力なテラヘルツ波を得るために、空間位相変調器を使用しないで近赤外域のフェムト秒パルスを波形整形するシステムを構築した。その結果0.3 mJのパルスエネルギーを持つフェムト秒パルスの強度と偏光状態を操作することができた。この技術は電子に対する光誘起された時間反転対称性の破れを実現する手段となりうる。

研究成果の概要(英文): This study demonstrates a fundamental physical phenomenon of manipulating the trajectory of electrons by optical pulse. In order to obtain a powerful terahertz wave that can change the trajectory of the electron beam, we demonstrate vector-field shaping of femtosecond near-infrared laser pulse without spatial light modulators. According to the result, instantaneous intensity tuning and polarization control of femtosecond near-infrared laser pulse with pulse energy of 0.3 mJ has been achieved. This is key technology to realize photon-induced time-reversal breaking of electron system.

研究分野：半導体光物性

キーワード：時間反転対称の破れ ベクトル波形整形 テラヘルツ波 光誘起磁場

1. 研究開始当初の背景

2 次元電子系に垂直に磁場を印加するとランダウ準位に応じた微細な縞状の伝導チャネルが電子系の端に形成される。この現象は元をたどれば磁場によって電子の軌道が曲げられた結果である。

近年磁場を印加する代わりにテラヘルツ領域の周波数を持つ円偏光の照射により電子の軌道に角運動量が転写されることが期待されている。例えばグラフェンなどの輸送測定において通常は定常磁場の印加によりホール抵抗が生じる。ところがキラリティを有するテラヘルツ円偏光の照射によって時間反転対称性が破られれば磁場の印加無しにホール抵抗や量子ホール状態が生じることが理論的に予想されている。この光照射により誘起された有効磁場は 10 T 以上に相当し瞬間的な発生消滅、周期的な反転が可能であり、一般的な超伝導マグネットで得られる定常磁場とは全く異なる環境を作り出すことができる。

しかし固体中の電子に対する試みでは温度上昇が伴い、有効磁場の瞬時変化を電氣的に捉えることは大変な困難を伴うため実験的な観測には至っていない。本当に光照射により有効磁場が誘起され時間反転対称性が破れるのか、それを実証するための実験系の構築が強く望まれている状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は円偏光の持つ角運動量を電子の軌道に転写することである。我々のグループはテラヘルツ周波数帯で偏光状態を自在に操作し、キラリティを有する円偏光の生成に成功している。このような偏光、位相、周波数の制御されたテラヘルツ周波数帯域の光パルス電子に照射することで、外部磁場の印加無しに強力かつ動的な光誘起磁場が発生することが理論的に予想されている。

この目的を達成するために本研究はこれまで想定されてきた固体中の電子ではなく、外部ポテンシャルの無いよりシンプルな環境である真空中の電子線に対し円偏光テラヘルツパルスを照射し、軌道の変化から有効磁場を算出するという新たな手法を提案する。

光から電子軌道への角運動量の転写は固体中の電子に対してだけでなく、真空中を移動する電子線に対しても起こるはずであり、この方法であれば室温においてより現実的に現象が捉えられると考えられる。ブラウン管等に見られるように一般的に電子線はコイルの作る磁場によるローレンツ力により軌道を制御される。この磁場の代わりにテラヘルツ円偏光の電場を用いることでまるで磁場がかかったかのように軌道を変化させることができるはずである。本研究では軌道の変化を検出器の観測位置の変化として捉え、どれ程の磁場に相当するのか算出する。

3. 研究の方法

(1) 円偏光テラヘルツパルスの高強度化

従来型の円偏光テラヘルツパルスの波形整形装置は空間位相変調器(SLM)を用いた方式である。まず光源から導かれた可視光領域の直線偏光パルスは回折格子でスペクトル成分に分解され SLM に導入される。SLM は 2 層構造を持ち $\pm 45^\circ$ 方向の直行 2 成分を独立に波長ごとに位相変調できる。この 2 成分は 1/4 波長板を通ることで一定のチャープを持つ右回り、左回りの円偏光パルスに変換される。これらは常に一定の周波数差が保たれているため GaP 結晶に同軸で通すことで円偏光のテラヘルツパルスが生成される。

この装置の光源のパルスエネルギーは 5 nJ であり、発生するテラヘルツパルスの電場強度は 6.2 V/cm と弱く、電子線の軌道を解析するにはミクロンオーダーで電子線の位置を検出する必要がある。そこでチタンサファイア再生増幅器から生成される 0.6 mJ のパルスを光源として用いた波形整形技術を開発する。

(2) 電子線源の設置

電子線源として電子銃を真空チャンバー内に設置する。電子線の軌道や広がり制御するための電極を設置する。

(3) 電子線へのテラヘルツ照射

真空チャンバー内の電子線にテラヘルツ波を照射するために真空チャンバーにテラヘルツ透過窓を設置する。またテラヘルツ波による軌道変化と磁場による軌道変化を比較するために照射位置周辺にマグネットを設置する。

(4) 軌道を変えられた電子線の検出

テラヘルツ円偏光パルスによって軌道を変えられた電子線はマイクロチャンネルプレート(MCP)にて増幅される。MCP によるゲインは 10^6 程で 500 eV 以下の単電子を検出することができる。MCP 前面にはスリットが設けられ、空間分解測定が可能であり電子線の軌道の解析を行うことができる。

(5) 有効磁場の算出

電子線の角度分解測定からテラヘルツ円偏光パルスにより誘起される有効磁場を算出する。その際シンクロトロン放射、及び電場勾配による電子の加速も考慮に入れる。テラヘルツ円偏光パルス照射領域に実際にコイルを置いて磁場を印加しその時の電子線の軌道と比較をする。また角度分解測定の解像度を高めるために電子線のコリメート、ピンホール形状、MCP 前のスリット構造を最適化する。

4. 研究成果

(1) 高強度近赤外域パルスに対応した波形成形技術

光誘起磁場の観測など多くの応用においては直線偏光が時間とともに回転していくパルスを生成できれば良く、空間位相変調器で得られる電場ベクトルほどの自由度は必要ない。これまで示してきたように左右の円偏

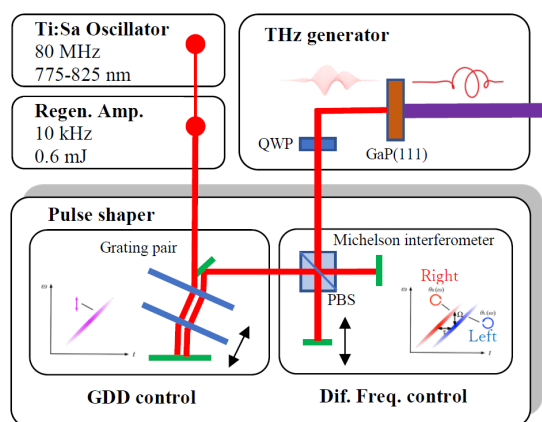


図1 回折格子対とマイケルソン干渉計を用いた円偏光テラヘルツパルスの生成システム

光パルスに2次分散を与えて引き伸ばし、1次分散で時間差をつけて周波数差を設けられれば目的の電場波形を持つパルスを得ることができ、最終的にテラヘルツ周波数領域で円偏光に波形整形された電場ベクトルを得ることができる。そこで図1に示したような空間位相変調器を用いずに2次分散を回折格子対、時間差をマイケルソン干渉計でつける光学系を構築した。光源はSpectra-Physics社製Solstice Aceを使用し、出射直後の光パルスは中心波長800 nm、帯域50 nm、パルス幅35 fs、パルスエネルギー0.6 mJである。ビーム直径は7.3 mmでありその引き回しのためにミラーは2インチの直径のものを使用している。パルスの引き伸ばしのための2次分散量は回折格子対の間隔で

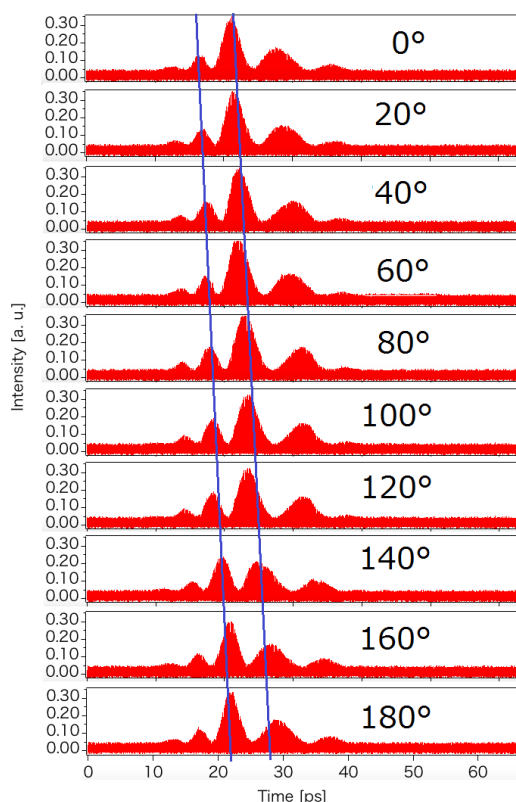


図2 偏光が時間変化するパルスと幅35 fsのパルスの偏光分割相互相関波形

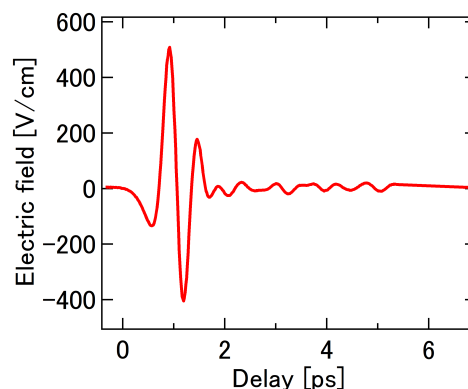


図3 EO サンプリングにより求められた高強度化されたテラヘルツパルスの電場強度

決められ、直交偏光2成分の時間差はマイケルソン干渉計の片方の終端のミラーを動かし光路差を変化させることで制御される。この方法に基づいて生成された偏光が時間変化するパルスの電場波形を評価するため、パルス幅35 fsのパルスとの偏光分割相互相関波形を図2に示す。回折格子対でパルスを30 psまで伸ばし、マイケルソン干渉計で200 fsの時間差をつけ、ねじれ偏光パルスの偏光は0°から180°まで回転させた。相関波形のピーク位置はねじれ偏光パルスを回転する楕円偏光とみなした時の長軸が和周波の検出される偏光方向と一致した瞬間を示す。この楕円偏光の偏光方位角が、切り出す偏光方向によって回転していき、0°でのピーク位置が180°における隣のピーク位置に移っていく様子が青のガイド線から確認できる。

(3)高強度化されたテラヘルツパルスの電場ベクトルの測定

高強度パルスに対応した波形成形システムを通過してきた近赤外パルスをテラヘルツ波に変換し、その電場ベクトルを確認するため電気光学サンプリングを行った。波形成形機を通過してきた0.3 mJ、35 fs、中心波長800 nmのパルスをGaP[111]に入射しテラヘルツ波を発生させた。そのテラヘルツ波と、それに同期したプローブ光をパラボリックミラーでガイドし、GaP[110]の1点でオーバーラップさせ電気光学サンプリングをおこなった。その結果、図3に示すように最大で509 V/cmの電場強度が得られた。これは従来のSLMを用いた波形成形テラヘルツパルスの電場強度の約100倍であった。

(4)電子線軌道変化測定系の構築

電子線を出射し、テラヘルツ波で軌道を制御し、単電子を角度分解で検出するチャンパーの設計、削り出し、組み立てを行った。完成した電子線軌道変化測定系を図4に示す。チャンパー内の電子銃により発射された電子線はチャンパー中央付近に導かれ、特注の透過窓を通過してきた円偏光テラヘルツ波に照射され軌道を変える。電子線は回転機構に

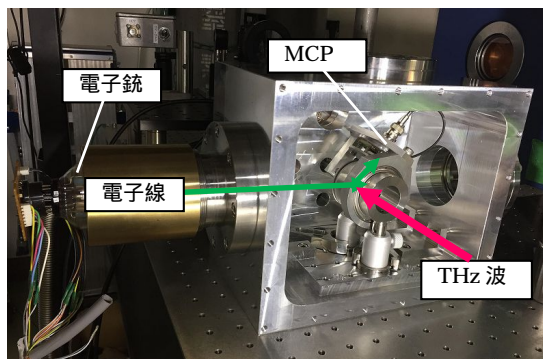


図4 電子線へ THz 波を照射し検出するためのチャンバーの内部構造

固定された MCP によって検出され、軌道の変化は角度分解測定によって行えるように設計してある。

電子線に対する円偏光テラヘルツパルス照射による有効磁場の算出と時間反転対称性の破れを検証するためのシステムが構築された。

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 4 件)

[1] "Development of vector-field shaping system of high power laser pulses for photon-induced time-reversal symmetry-breaking" H. Ito and K. Misawa, proceedings of ICO-24, 査読あり, (2017accepted)

[2] "Femtosecond time-resolved X-ray absorption spectroscopy of anatase TiO₂ nanoparticles using XFEL," Y. Obara, H. Ito, T. Ito, N. Kurahashi, S. Thurmer, H. Tanaka, T. Katayama, T. Togashi, S. Owada, Y. Yamamoto, S. Karashima, J. Nishitani, M. Yabashi, T. Suzuki, and K. Misawa, Structural Dynamics, 査読あり, 4, 044033 (2017).

[3] "時間的に偏光制御された近赤外域フェムト秒パルスの高強度化" 伊藤宙陞 三沢和彦 信学技報 116, 査読なし, 2016年, 63-66

[4] "Applications of polarization-shaped femtosecond laser pulses," K. Misawa, Advances in Physics: X, 査読あり, 1, 544-569 (2016).

[学会発表](計 4 件)

[1] Hironori Ito and Kazuhiko Misawa, "Development of vector-field shaping system of high power laser pulses for photon-induced time-reversal symmetry-breaking" The 24th congress of the international commission for optics, Tokyo, Japan (21 August, 2017)

[2] Kazuhiko Misawa, "Interdisciplinary Research Initiative of Photon-nano Science in TUAT," IRAGO Conference, Chofu, Japan (1 November, 2016)

[3] 伊藤宙陞 三沢和彦 "電子輸送制御に向けた高強度近赤外域フェムト秒パルスの時間的な偏光操作" 日本物理学会秋季大会、金沢大学、2016年9月14日

[4] 伊藤宙陞 三沢和彦, "時間的に偏光制御された近赤外域フェムト秒パルスの高強度化" レーザー・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) 福井市地域交流プラザ、2016年5月20日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 宙陞 (ITO, Hironori)
東京農工大学・大学院工学研究院・特任助教
研究者番号: 60724127

(3) 連携研究者

三沢 和彦 (MISAWA, Kazuhiko)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80251396