

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800280

研究課題名(和文) レーザー加速パルス電子源の周辺プラズマ・電磁場制御による超高強度化

研究課題名(英文) Highly intensified emission of laser-accelerated electrons from a foil plasma by controlling the density and electric field distributions

研究代表者

井上 峻介 (Inoue, Shunsuke)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：40724711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：高強度短パルスレーザーを固体物質に照射した際に加速される電子パルスは、高輝度、極短パルスといった特徴を有しており、超高速に変化する現象を観察可能な電子源としての可能性を秘めている。高強度レーザーにより加速される電子のうち、そのほとんどはシース電場と呼ばれる極めて強い準静的な電場に捉えられてしまうため、利用可能な電子は極めて少なかった。本研究では、高強度レーザーを照射する周辺のプラズマ密度分布を、もう一つの高強度レーザーを用いて制御することで電場の発生を抑制し、利用可能な電子の数を向上させることに成功した。また、これらの結果を数値シミュレーションや簡易モデル評価によりよく説明することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The laser-accelerated electron pulses have great potential for ultrafast science because of their high brightness and short bunch length. However, the majority of the fast electrons cannot escape from the laser irradiation target because they are trapped by a strong quasi-static electric field, called the sheath field, produced around the steep density gradient boundary. We suppressed the sheath field by using two time-delayed femtosecond laser pulses to control the electron density distributions of the target and substantially increase of the number of escaping electrons. The experimental results are well supported by numerical simulations and analytical evaluation.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高強度レーザープラズマ フェムト秒レーザー レーザー加速

1. 研究開始当初の背景

電子や中性子、X線などの量子ビームを用いた物質構造解析は、基礎物理、物質科学から生命科学などの広範な分野において多大な貢献をしてきた。近年、さらなる物質内諸現象の解明を目指し、短パルスの量子ビームを用いることで物質中の超高速に変化する現象を捉える研究が急速に発展している。特に、数10keVから数100keVのエネルギーを持つ電子パルスは、溶解や凝固、化学結合の切断と結合などのピコ秒からフェムト秒の間に変化する内部構造変化や、超高速に変化するレーザープラズマ電磁場の測定などへ応用が期待され、精力的に研究されている。パルス幅が短く、1パルスあたりの電子数の多い高強度短パルス電子源を開発できるか否かが、これら超高速現象研究の発展の鍵を握っている。

しかしながら、フォトカソードRF電子銃やフォトカソードDC電子銃に代表される従来型の電子源は、空間電荷効果のために電子の短パルス化と高強度化の両立が本質的に困難であるという問題を抱えている。また、フォトカソード表面の光学損傷のため飛躍的な高強度化が困難である。超高速現象研究のさらなる発展のためには、現行手法に替わる超高強度短パルス電子源の開発が必須となっている。

申請者は、高強度フェムト秒レーザーにより直接加速される高エネルギー電子に着目し、これを用いた新たな短パルス電子源開発を行ってきた。高強度フェムト秒レーザー (10^{18} W/cm^2) を固体薄膜に集光照射すると、微小な領域に瞬間的に高エネルギー密度状態のプラズマが生成され、高エネルギーの電子が発生する。このレーザー加速電子パルスは空間電荷効果や光学損傷の問題がなく、さらに別途電子加速器が不要であり、新たな高強度短パルス電子源としての可能性を秘めている。これまでに、レーザー加速電子パルスを超高速現象観測へ応用するための基礎研究を行い、さらに数100フェムト秒という超高速に変化するレーザープラズマ電場の測定に成功することで、短パルス電子源としての有効性を世界に先駆けて示してきた。更なる応用発展のためには、レーザー加速電子パルスの高強度化を達成する必要がある。

2. 研究の目的

申請者は近年、高強度フェムト秒レーザーと固体薄膜の相互作用による電子加速の際、強度の低い (10^{16} W/cm^2) フェムト秒レーザーを薄膜裏面に300ピコ秒早く照射すると、レーザー加速電子パルスの強度が単一照射の場合に比べ10倍以上向上することを発見した。本結果は、電子を収集するための電子光学系の最適化により100fCを超える電子パルスが得られることを示している。このような電子パルスの高強度化現象について

の報告はこれまでになく、そのメカニズムは明確でない。しかし、2つのレーザーパルス間の遅延時間をより多く与えることで、更なる高強度化達成の可能性を秘めていることが示唆されていた。本研究では、電子パルス高強度化のメカニズム解明とともに最適化を行うことで、1パルスあたりの電子数が1pCを超える、世界最高の超高強度短パルス電子源の実証を目指した。

3. 研究の方法

電子パルス高強度化が起こる際の詳細な電子の振る舞いや電子源周辺の環境を、種々の計測法を用いることで明らかとする。測定結果を解析するための数値計算を並行して進め、電子パルス高強度化の物理的な描像を明らかとする。

(1) 時間分解干渉計の構築によるプラズマ密度分布の測定

本実験では2つのフェムト秒レーザーパルス(ここではCPA1、及びCPA2と呼称する)を、数100ピコ秒の遅延時間を与えて照射することでレーザー加速電子パルスの強度を向上することに成功している。この原因は、先に照射される強度の低いフェムト秒レーザー(CPA2、強度： 10^{16} W/cm^2)により生成されるプラズマや電磁場の影響によるものと推察される。そこで、時間分解干渉計を新たに構築し、数100ピコ秒のスケールで膨張しているプラズマの密度や形状を測定した。

(2) 電子エネルギースペクトル測定器及び電子放射角度分布測定器による電子パルス特性の測定

時間分解干渉計によるプラズマ密度の測定とともに、加速電子パルスの重要な特性であるエネルギースペクトル、及び放射角度分布を計測した。これらの測定を通して、電子パルスが高強度化される条件を詳細に調べた。

(3) 電磁粒子コードを用いた電子パルス特性の数値計算

(1)で解析されたプラズマ中で、高強度フェムト秒レーザーがどのように電子を加速しているかについて電磁粒子コード(PICコード)を用いて解析した。本計算により得られる電子パルスのエネルギースペクトルなどの特性と、(2)により得られる結果を比較検討し、レーザー加速電子パルスの高強度化が起こるメカニズムについて詳細に解析・考察した。

(4) レーザー照射ターゲットプラズマの膨張を考慮したモデル計算

実験結果を説明するため、モデル計算を行った。モデルでは、レーザー照射ターゲットの形状がCPA2を照射することにより膨張し、CPA1により加速される電子パルスが放射されるターゲットが大きくなっている様子を

考慮しており、ターゲットの大きさに依存してレーザー加速電子パルスが高強度化する様子を再現した。さらに計算結果と実験結果を比較し、高強度化する機構を考察した。

4. 研究成果

(1) 時間分解干渉計の構築によるプラズマ密度分布の測定

新たに構築した時間分解干渉計によるプラズマ密度分布の測定結果を図1に示す。CPA2照射より0ps秒後および300ps後の干渉画像である。これよりCPA2によりスケール長が12 μ mのプラズマが膨張している様子が明らかとなった。さらに詳細にプラズマの膨張を調べ、その密度分布を楕円アーベル変換により解析したものを図2に示す。プラズマがおよそ100-200km/sの速度で膨張している様子が明らかとなった。

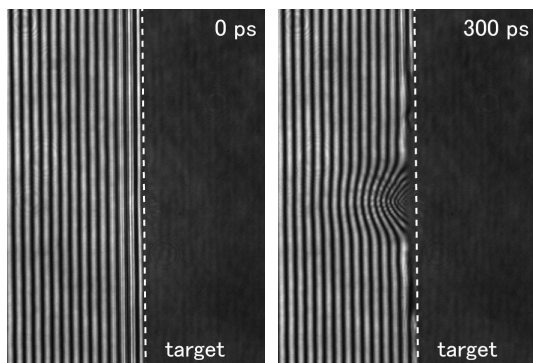


図1：干渉測定結果

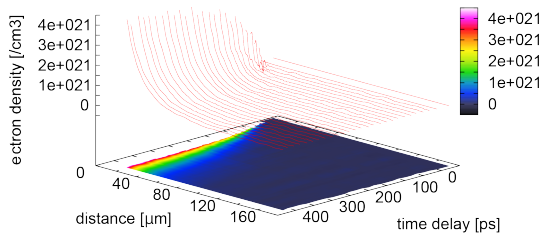


図2：電子密度分布の時間発展

(2) 電子エネルギースペクトル測定器及び電子放射角度分布測定器による電子パルス特性の測定

電子エネルギースペクトルを測定した結果を図3に示す。遅延時間を増大させることにより発生する電子の数が増えている様子が明らかとなった。エネルギーが1MeV以上の、高エネルギー部分の傾きは遅延時間によらずほぼ一定であるが、それ以下のエネルギーの電子数が大幅に増大の様子が見られた。これらの結果により、真空中へと放射され検出器へと到達することのできる電子が増大する理由として、二つの点が示唆される。一つ目が、低エネルギーの電子が増大する理由として、CPA2により形成されたプラズマ密度分布により、通常薄膜の裏面に形成されるシース電場の形成が阻害されている、ということである。シース電場は高速電子が真空中

へと集団的に放出された際に、真空と金属表面の間に電荷の分離を引き起こし、極めて強い電場が形成される現象であり、この電場によって電子の軌道が偏向されることや、ターゲットの中へと反射されることが知られている。CPA2の照射によりシース電場の形成が阻害されたため、この電場の影響をより強く受けるエネルギーの低い電子が、より多く真空中へと放出された可能性がある。また、二つ目の点として、高エネルギー側の電子のスペクトルが変わっていないことから、CPA1の吸収・電子の加速過程は大きな影響を受けていない点があげられる。これらの結果を解析するため(3)により数値シミュレーションを行った。

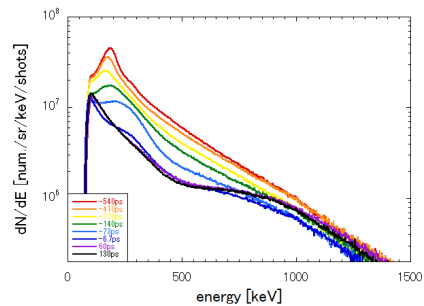


図3：電子エネルギースペクトルの遅延時間依存性

電子の放射角度分布を測定した結果を図4に示す。CPA1のみを照射した場合の放射角度分布により規格化した値を示している。CPA2を照射し、遅延時間を大きくすることで、放射角度分布はターゲット薄膜の垂直方向(図4中の90°方向)へと大きく増加した。プラズマの密度分布は(1)で得られたように、薄膜より垂直方向へと分布してゆく。この分布の結果の影響を強く受けるように、電子の放射角度分布はターゲット薄膜の垂直方向へと分布が大きく変化していた。すなわち、CPA1照射ターゲットが薄膜から半球状のプラズマへと変化することで、放射される電子の角度分布が変化し、さらに放射電子数が増大する。レーザー加速電子が放射されるターゲットのプラズマ密度分布の形状が、真空中へと放射される電子の運動に強く影響を与えていることを示している。この結果は(4)によりより詳しく解析されている。

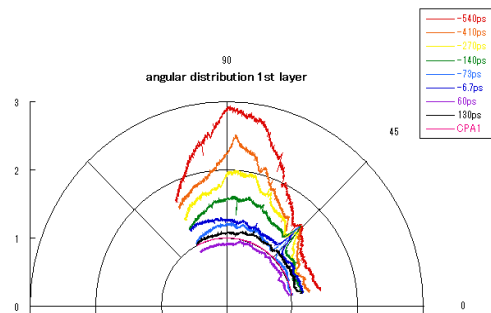
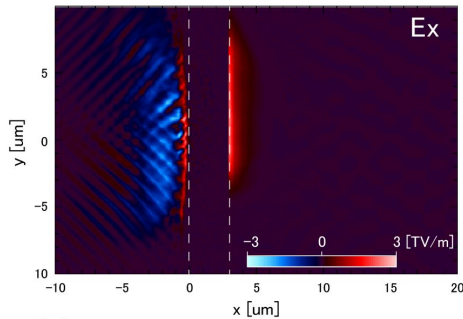


図4：電子放射角度分布の遅延時間依存性

(3) 電磁粒子コードを用いた電子パルス特性の数値計算

PIC シミュレーションにより、電子の発生の様子を模擬した。図5にその結果を示す。(1)によりターゲットのプラズマ密度分布の様子を測定したが、この密度分布の影響を考慮しており、図5(b)では楕円形状プラズマをターゲット薄膜の後方に設置して計算を行っている。図5(a),(b)ではそれぞれ、プラズマより電子が真空中へと放出された瞬間の電場振幅の大きさを示している。楕円形状のプラズマを設置した場合(図5(a))、ピークが3TV/mの極めて強い電場が形成されている。一方、プラズマを設置した場合はこのような強い電場の形成は確認されなかった。さらに、それぞれの場合について電子のエネルギー分布を解析すると、低エネルギーの電子がプラズマを設置した場合に増大していた。これらの結果は実験結果(2)のエネルギースペクトル測定結果と定性的によく一致しており、シース電場の有無が放射電子に大きく影響を与えることを示唆している。

(a)



(b)

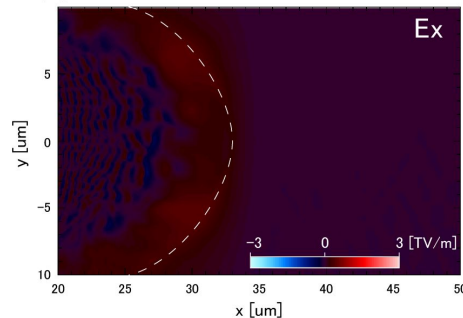


図5：PICコードを用いた数値計算結果

(4) レーザー照射ターゲットプラズマの膨張を考慮したモデル計算

電子の増大する様子をより詳しく調べるため、モデル計算を行った。Fillにより示される次式

$$\frac{\ln \xi_{\infty}}{\xi_{\infty}} = -\frac{r_c m_e c^2}{r_0 k_B T_h} N_{\text{total}}$$

と本実験で得られる結果を比較した結果が図6である。ここで、 ξ_{∞} は放射される電子の割合、 r_0 はレーザー照射ターゲットの初期プラズマを球体としたときの半径、 N_{total} は加速された電子数、 $k_B T_h$ は電子エネルギースペクトルをボルツマン分布で近似したときの

温度をそれぞれ示している。半径 r_0 を横軸とした場合、無限遠まで到達することのできる電子数の割合 ξ_{∞} を計算すると図6の実線のようになる。一方、実験結果により得られた電子数が赤い丸でプロットされている。初期のサイズとして(1)の測定により得られたプラズマのサイズを、無限遠まで到達した電子の数としては(2)の測定で得られた値を用いている。図に示すように、実験とモデル計算による結果は良い一致を示しており、特に初期サイズの大きさが大きくなるにつれて無限遠まで到達することのできる電子の数が増大する様子、また、その増大率をよく再現していることが分かる。

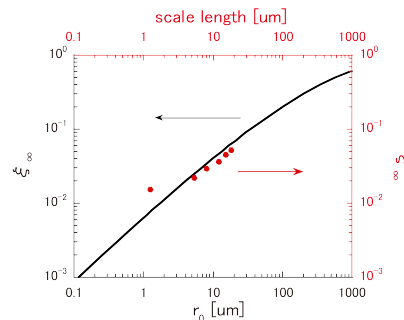


図6：ターゲットプラズマの膨張を考慮したモデル計算(実線)と実験結果(赤点)の比較

以上の一連の実験及び計算結果より、電子パルスが増大するメカニズムが明らかとなった。

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2件)

阪部 周二, 倉田 博基, 橋田 昌樹, 時田 茂樹, 井上 峻介, 根本 隆, 治田 充貴, 渡邊 浩太

「電子顕微鏡の進化とレーザー加速電子を用いた超高速電子線回折法」

レーザー学会誌, 査読あり, vol. 43, pp. 138-143 (2015年3月)

Shunsuke Inoue, Shigeki Tokita, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe

“Transient changes in electric fields induced by interaction of ultraintense laser pulses with insulator and metal foils: Sustainable fields spanning several millimeters”

Phys. Rev. E vol. 91, p043101 (2015)

〔学会発表〕(計7件)

井上峻介, 寺本研介, 渡邊浩太, 中地亮介, 中宮義英, 橋田昌樹, 阪部周二

“フェムト秒レーザー照射薄膜の周辺電磁場制御による放射高速電子の高強度化”

レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会、名城大学 天白キャンパス (2016 年 1 月 9 日 ~ 11 日)

井上峻介、寺本研介、橋田昌樹、阪部周二
“高強度レーザーの固体への複合照射によるレーザー加速電子ビーム制御”
第 13 回 高輝度高周波電子銃研究会、京都大学 宇治キャンパス (2015 年 12 月 6 日 ~ 7 日)

井上峻介、寺本研介、渡邊浩太、中地亮介、中宮義英、橋田昌樹、阪部周二
“照射薄膜からの高速電子のフェムト秒レーザープラズマによる制御”
日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学 千里山キャンパス (2015 年 9 月 16 日 ~ 19 日)

井上峻介、寺本研介、中島佑人、中宮義英、橋田昌樹、阪部周二
“サブナノ秒の遅延時間を持つ 2 つのフェムト秒レーザーパルス照射薄膜からの電子ビーム特性”
日本物理学会 第 70 回年次大会、早稲田大学 早稲田キャンパス (2015 年 3 月 21 日 ~ 24 日)

井上峻介、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二
“高強度短パルスレーザーと金属薄膜・細線との相互作用による電子発生・加速”
レーザー学会学術講演会 第 35 回年次大会、東海大学 高輪校舎 (2015 年 1 月 11 日 ~ 12 日)

S. Inoue, K. Teramoto, Y. Nakashima, Y. Nakamiya, M. Hashida, and S. Sakabe
“Characteristics of the electron beam generated by irradiation of foil target with femtosecond laser plasma”
Plasma Conference 2014, Tokimesse, Niigata, Japan (November 18 - 21, 2014)

S. Inoue, M. Hata, D. Ikeda, K. Maeda, M. Hashida, and S. Sakabe
“Intensity enhancement of electron beam generated by irradiation of two femtosecond laser pulses on foil target”
High Energy Density Sciences 2014, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan (April 22 - 25, 2014)

〔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
井上峻介 (INOUE, Shunsuke)
京都大学, 化学研究所, 助教

研究者番号 : 40724711

(2) 研究分担者 ()

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :