

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17845

研究課題名(和文) 固体-プラズマハイブリッドカソードを用いたレーザー駆動高強度短パルス電子源の実証

研究課題名(英文) Demonstration of laser-driven ultrafast and intense electron source with solid-plasma hybrid cathode

研究代表者

井上 峻介 (Shunsuke, Inoue)

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：高強度短パルスレーザーを固体標的に照射した際に駆動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、電子放出を増強するため新標的として、固体-プラズマハイブリッドカソードを提案し、これを用いた短パルス電子ビーム発生装置の開発を実施した。

研究成果の概要(英文)：Fast electrons accelerated through interactions of intense femtosecond laser pulses with solid target have great potential as a probe pulse to observe ultrafast phenomena, because they have advantages of high intensity and a short pulse. However, the most of the fast electrons cannot use as the probe pulse because they are trapped by a strong quasi-static electric field, called the sheath field, produced around the steep density gradient boundary. We proposed a solid-plasma hybrid cathode as a new target to increase the number of fast electrons escaping from the sheath field, and developed a short pulse electron beam generator with this target.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：高強度レーザー 短パルス電子源 高強度電子源

1. 研究開始当初の背景

電子や中性子、X線等の量子ビームを用いた物質構造解析は、原子サイズの高い空間分解能を有している。このため、基礎物理、物質科学から生命科学等の広範な分野において、今日までの目覚ましい発展に多大な貢献をしており、これらの分野において必要不可欠な手法となっている。さらなる物質内諸現象の観察を行うべく、近年、“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といった、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さらなる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。さらに、フォトカソード表面の光学損傷のため、1パルスあたりの電子数を飛躍的に増大させることが難しい。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。我々は、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の開発を行ってきた。集光強度が 10^{18} W/cm²を超える高強度フェムト秒レーザー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加速される。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、高強度な電子線を発生させることができる。また、高強度短パルスレーザーにより電子の加速が同時に行われるため、別途電子加速装置を付随させることなく相対論速度の電子を発生させることができ、装置の小型化や、真空槽内の低真空度化が達成されるため、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。

2. 研究の目的

申請者は独自に開発したレーザー加速電子分析器による実験中、強度の異なる二つのレーザーを、遅延時間を与えて固体薄膜へ照射すると、電子数が飛躍的に増大する現象を

発見していた。本現象を精緻に調べた結果、固体にあらかじめプラズマを付加した物質を電子源のためのカソードとして用いたため高強度化が実現していることを突き止めた。この“固体-プラズマハイブリッドカソード”を用いて、電子の数が1pCを超える超高強度電子源の実証に成功した(図1)。

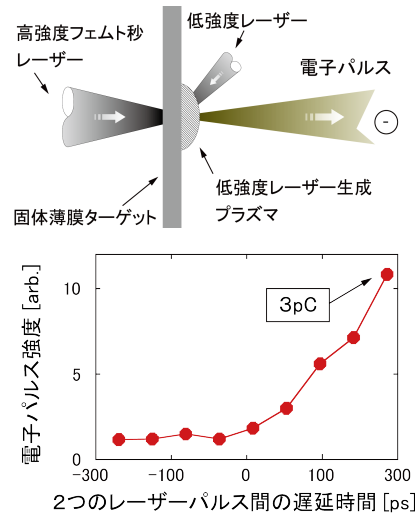


図1 二つのレーザー照射による電子パルス高強度化実験の模式図と実験結果

さらに、数値シミュレーションによると、本カソードより放射される電子パルスの時間幅は短く、短パルス電子ビーム発生装置を新たに開発することで、超高強度短パルス電子源の実現が可能であることが示唆されている。本研究ではこの固体-プラズマハイブリッドカソードを用いることで、“短パルス”と“高強度”を同時に満たした、世界最高の電子源の実証を目的とした。

3. 研究の方法

固体-プラズマハイブリッドカソードは二つのレーザーパルスを照射することで生成される。これまでの研究により、本カソードの性能は非常に多くの条件に依存することが明らかとなっている(それぞれのレーザーパルスのエネルギー、照射強度、照射タイミング、照射角度、カソード材質など)。短パルス電子発生装置へ本カソードを実装するためには、レーザーの出力や光学素子の設置場所などへの制限があるため、これまでの研究により見出されていた条件を大幅に変更する必要がある。これらの条件を最適化することで、1pCを超える電子数を放射可能、かつ短パルス電子発生装置へと実装可能なカソードの開発を実施する。さらに、この固体-プラズマハイブリッドカソードを実装可能な、短パルス電子ビーム発生装置の設計及び製作を行う。開発済みの短パルス電子ビーム発生装置は、カソード部分に二つのレーザーを照射することを想定していないため、大幅な設計変更が必要になる。本装置に用いられる各々の素子について再設計し、新規装置を開発する。最後に、開発した短パルス電

子ビーム発生装置より得られる電子のパルス幅、及び電子数を測定することで、超高強度短パルス電子源を実証する。

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

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： 1×10^{15} W/cm²）により生成されるプラズマが、固体薄膜ターゲットの密度空間分布に変調を与えているためである。変調は大きいほど良いことが理論により示されているが、これまで、遅延時間は数100psしか与えることができなかった。そこで、長時間の遅延時間を与えることのできる遅延光路を新たに構築し、電子パルスの高強度化を試みた。また、その際に形成されるプラズマの大きさを観察するための時間分解干渉計を新たに構築し、ナノ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。

時間分解干渉計によるプラズマ密度分布の測定結果と、同時に撮影されたシャドウグラフを図1に示す。CPA2照射より0ps、500psおよび1.47ns後のシャドウグラフと干渉画像である。CPA2照射より1.47ns後に、スケール長がおおよそ25 μ mのプラズマが存在していることが明らかとなった。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。プラズマがおおよそ100-200km/sの速度で膨張しており、遅延時間を大きくとるほど大きなプラズマが生成される様子が明らかとなった。

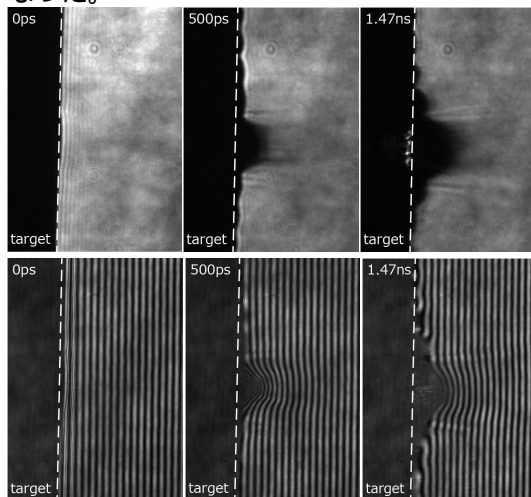


図2：シャドウグラフ（上）と干渉（下）測定結果

(2) 電子エネルギースペクトル測定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

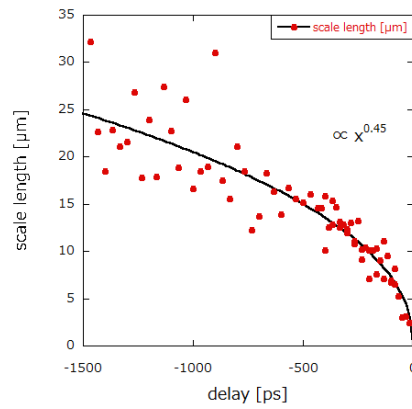


図3：電子密度分布の時間発展

あるエネルギースペクトルを計測した。これらの測定を通して、短パルス電子発生装置へと実装可能な、高強度電子パルスを発生させるための固体-プラズマハイブリッドカソードの生成条件を詳細に調べた。

電子エネルギースペクトルを測定した結果を図4に示す。グラフ中の色はCPA1とCPA2の間に与えた遅延時間の違いを表している。遅延時間を増大させることで、発生する電子の数を大幅に増大させることができおり、固体-プラズマハイブリッドカソードが機能している様子が分かる。また、1.47nsの遅延時間を与えた場合、検出器へと到達した総エネルギーは、CPA2を照射しない時の場合に比べておおよそ10倍であった（図5）。

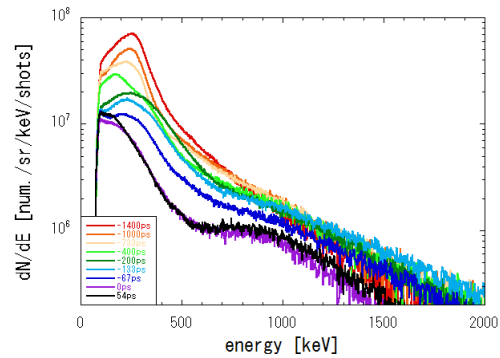


図4：電子エネルギースペクトルの遅延時間依存性

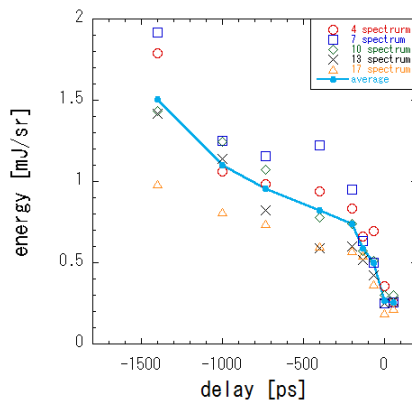


図5：電子総エネルギーの遅延時間依存性

(3) 固体 - プラズマハイブリッドカソードによる電子ビーム高強度化

(1)および(2)により得られた条件をもとに、固体 - プラズマハイブリッドカソードより発生する電子をビームとして取り出し、その電子数やビーム径を測定した。固体 - プラズマハイブリッドカソードより放出される電子を、新たに設計した電子レンズによりビームとしてコリメートし、蛍光スクリーンへと像転送した。この電子ビームの空間プロファイルを高感度冷却 CMOS カメラにより観察した。さらに遅延時間や CPA2 の強度と共にこれらのパラメータがどう変化するかを測定して、固体-プラズマハイブリッドカソードの性能を評価した。

固体 - プラズマハイブリッドカソードを用いて電子ビームが高強度化される様子を図 6 示す。CPA2 レーザーを照射しプラズマを形成させることで、CPA2 を照射しなかった場合に比べて極めて高強度な電子ビームを取り出すことに成功している。図 7 は、電子ビームプロファイルの遅延時間依存性を表している。赤い丸で示されたプロットは電子ビームの強度、青い四角で示されたプロットは電子ビームの直径をそれぞれ示している。電子ビームの直径を保ったまま、電子ビームの強度が次第に強くなっている様子が分かる。この結果は、(1)により得られたプラズマの膨張から予想された通りであり(図 2)、固体 - プラズマハイブリッドカソードが設計通りに機能していることが明らかとなっている。さらなる高強度化を目指し、CPA2 の照射強度を変更し、同様に電子ビームプロファイルの遅延時間依存性を測定した結果を図 8 に示す。電子ビーム強度はさらなる高強度化を示したが、その出力はショットごとに不安定なものとなった。CPA2 により固体が完全に破損され、CPA1 到達時に固体 - プラズマハイブリッドカソードとして機能していないことが原因であると予想される。本結果は、固体薄膜ターゲットの材質や厚さなどの調整により更なる最適化ができる可能性があることを示唆しており、今後の課題となっている。

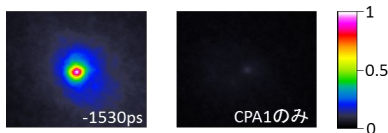


図 6 : CPA2 を照射した場合 (左) としなかった場合 (右) の電子ビームプロファイル

(4) 短パルス電子発生装置の開発

固体 - プラズマハイブリッドカソードから放射される電子パルスを高効率に伝送する電子レンズや電子パルスを圧縮するための磁気パルス圧縮器などの、短パルス電子ビーム発生装置の個々の磁気光学素子について再設計・試作・試験を行い、短パルス電子

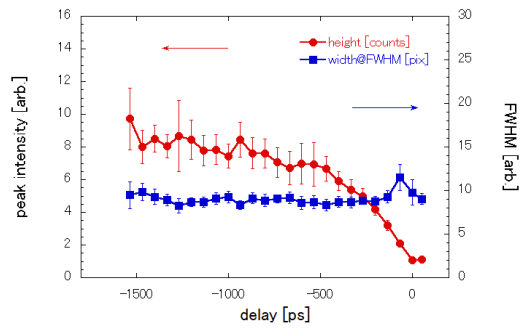


図 7 : 電子ビームプロファイルの遅延時間依存性 (CPA2、強度 : 1×10^{15} W/cm²)

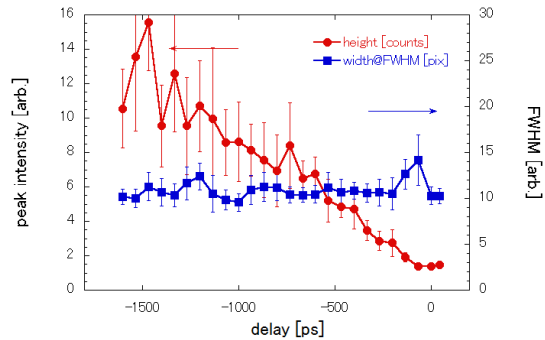


図 8 : 電子ビームプロファイルの遅延時間依存性 (CPA2、強度 : 2×10^{16} W/cm²)

ビーム発生装置の開発を行った。これらの電子光学素子の設計には、二つの計算コード (静磁場計算コード ; POISSON SUPERFISH パッケージ、及び三次元荷電粒子軌道計算コード ; GENERAL PARTICLE TRACER コード) を用いた。

開発した短パルス電子ビーム発生装置を用いて撮影された金の回折像を図 9 に示す。左側が金の単結晶を撮像したもの、右側が金の多結晶を撮像したものである。単結晶の場合、高次の回折まで明瞭に観察することができ、これまで不可能であった単一照射による金多結晶像の撮影にも成功した。この時の電子はおよそ 0.2pC であった

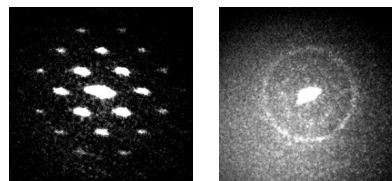


図 9 : 単一短パルス電子による金単結晶 (左) 及び多結晶 (右) の回折像。

(5) 電子パルス幅の測定による超高強度短パルス電子源の実証

短パルス電子ビーム発生装置を用いて得られた電子パルスのパルス幅を測定した。測定は高強度フェムト秒レーザーと電子ビームを交差させ、各々の直接相互作用を利用した相互相関を計測する方法により計測した。電子パルスとレーザーパルスを時・空間的に同期して交差させると、電子パルスの一部がレーザーパルスにより散乱される。この時散

乱された電子数と散乱される力の大きさの積を相関関数として測定する。相互相関関数は、フェムト秒レーザーのパルス幅と集光径及び短パルス電子ビームのパルス幅、ビームサイズなどの積分として解析的に解くことで求めた。短パルス電子ビームの生成に当たっては、短パルス電子ビーム発生装置の様々な磁気光学装置やレーザーパルスなどを、前述の数値計算コードを用いながら調整し、実験結果とのフィードバックを行ながら実施した。

図10に測定結果を示す。横軸は強度フェムト秒レーザーと電子パルスとの相対的な遅延時間を、縦軸は高強度短パルスレーザーと電子パルスの相関関数を示しており、赤点で示されたプロットが実験結果を、実線は結果をガウス関数でフィッティングしたものである。相関関数の半値全幅は143fsであり、電子ビームのパルス波形がガウシアンであると仮定すると、パルス幅がおよそ110fsの電子ビームを得ることに成功した。

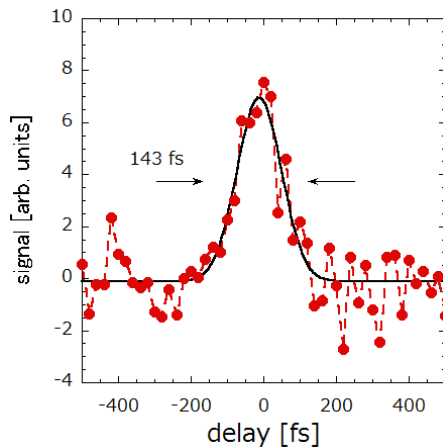


図10：高強度短パルスレーザーと電子パルスを相互作用させることにより得られた相関関数。

まとめ

強度の異なる二つのレーザーを、遅延時間を与えて固体薄膜へ照射することで得られる“固体-プラズマハイブリッドカソード”を用いて“短パルス”と“高強度”を同時に満たした、世界最高の電子源の実証を目的とした。固体プラズマハイブリッドカソードを短パルス電子発生装置へとインストールするための様々な条件の検討と、これを実装可能な短パルス電子ビーム発生装置の設計及び製作を実施した。得られた電子のパルス幅と電子数を測定すると、それぞれ0.2pC、110fsであった。カソード材料の検討により、さらなる高強度化が見込まれる結果が得られており、今後の課題である。

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)

Shunsuke Inoue, Yoshihide Nakamiya, Kensuke Teramoto, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe

“Highly intensified emission of laser-accelerated electrons from a foil target through an additional rear laser plasma,”

Phys. Rev. Accel. Beams vol. 21, 041302 (2018)

Shunsuke Inoue, Kazuya Maeda, Shigeki Tokita, Kazuaki Mori, Kensuke Teramoto, Masaki Hashida, and Shuji Sakabe

“Single plasma mirror providing 10^4 contrast enhancement and 70% reflectivity for intense femtosecond lasers”

Applied Optics Vol. 55, Issue 21, pp. 5647-5651 (2016)

〔学会発表〕(計 6件)

井上峻介、寺本研介、小島 完興、橋田昌樹、阪部周二

“フェムト秒レーザー加速電子を用いた電磁場の時間分解イメージング測定”

日本物理学会 第73回年次大会、東京理科大学 野田キャンパス (2018年3月22日～25日)

井上峻介、中宮義英、寺本研介、小島 完興、橋田昌樹、阪部周二

“高強度レーザー駆動短パルス電子による動的な電磁場のラジオグラフ測定”

レーザー学会学術講演会 第38回年次大会、京都府京都市勤業館みやこめっせ (2018年1月24日～26日)

井上峻介、中宮義英、寺本研介、橋田昌樹、阪部周二

“超高速現象観測のための固体薄膜-プラズマ複合ターゲットによるレーザー加速電子源”

Plasma Conference 2017、兵庫県姫路市姫路商工会議所 (2017年11月20日～24日)

井上峻介、中宮義英、寺本研介、橋田昌樹、阪部周二

“固体-プラズマ複合ターゲットからのレーザー加速電子パルスの特性”

日本物理学会 第72回年次大会、大阪大学豊中キャンパス (2017年3月17日～20日)

井上峻介、中宮義英、寺本研介、橋田昌樹、阪部周二

“レーザー駆動高強度電子源のための固体-プラズマ複合ターゲット”

レーザー学会学術講演会 第37回年次大会、徳島大学 常三島キャンパス (2017年1月7日～9日)

井上峻介、中宮義英、寺本研介、橋田昌樹、
阪部周二
“ 固体プラズマハイブリッドターゲットによるレーザー加速電子パルスの高強度化 ”
第 77 回 応用物理学会 秋季学術講演会、新潟県新潟市朱鷺メッセ (2016 年 9 月 13 日 ~ 16 日)

〔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:

(4) 研究協力者

()