

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

モハメド ハッサム アブデルラハマン

近年のテーブルトップテラワットレーザーの急速な進歩によって、レーザー励起プラズマによる電子加速の分野において多数の様々な研究が盛んとなっている。本論分では、超短パルス大強度レーザーとガスジェットプラズマとの相互作用によって、1つのレーザーパルスのみを使って相対論的エネルギーを持った極短電子パルスを生成することを目的として、2次元 PIC シミュレーションを用いた数値計算および 12TW50fs レーザーを用いた実験の両面から研究が行われている。

第1章では、レーザープラズマに基づく先進的な加速器を構成する主要な概念の背景にある基礎的な物理について概観している。さらに、本研究において採用されている加速機構である、単一の超高強度レーザーパルスを用いて超短パルス電子バンチを生成する手法について解説を行っている。特に本手法では、外部からの電子入射が不必要なこと、プラズマ航跡場砕波による電子入射の実証の2点が強調されている。10fs程度の極短電子パルスが安定に生成できれば、放射線化学研究の時間分解能も数十 fs と格段に向上される。

第2章ではレーザープラズマ相互作用に対する2次元 PIC シミュレーションとその計算結果について述べている。計算コードは原研開発のものとして UCLA 開発の OSIRIS の2つを併用した。前者はプラズマ長 200micro-m が限界であるが、後者は moving window 機能があるため、その制約はなく、実験と同様の 2mm 程度も可能である。そこでは、台形型密度分布を持つ臨界密度未満のプラズマに対して、単一の超短パルス高強度レーザーが入射した際に生じる航跡場によるプラズマ電子の加速機構について、数値計算による説明が成されている。2種類のプラズマ密度に対応する数値計算により、プラズマ波の「砕波」が支配的な役割を果たす状況とそうでない状況における加速された電子のエネルギー分布、電荷量等の諸特性を明らかにしており、高強度レーザーとプラズマとの相互作用によるプラズマ波の砕波とその後のレーザー航跡場による電子加速が高エネルギー電子ビーム生成に有効であることを確認している。特に高密度 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ (2mm 口径のガスジェットで数気圧) で 15fs 程度の電子シングルバンチ (エネルギー分散は 100%) の生成を確認した。これら数値解析は砕波入射法に関する2次元での世界で初めてのものとなっている。さらには、砕波のみならず、高出力レーザーの電磁場による前段加速の重要な役割を果たしているモデルを新たに提案した。

第3章は実験装置に関する記述に当てられている。そこではパルス駆動ガスジェットとテーブルトップテラワットレーザーの組み合わせによるレーザープラズマ相互作用の実験体系の製作と、それによって発生する電子の諸特性を評価する測定系の設計・製作が行われている。ガスジェットの最大の背景ガス圧は ~ 80 気圧であり、高い圧力によって高いプラズマ密度 (10^{20}cm^{-3} 台) を達成することが可能である。ガスジェットの密度分布は Mach-Zender 型干渉計によって測定され、十分高密度のガス密度を達成することが可能であることが確認されている。

第4章では実験結果について述べている。実験では、ガスジェットからのヘリウムガスに 12TW50fs レーザーを集光することで発生する電子ビームの全電荷量と横方向プロファイルを測定している。真空チャンバから 50micro-m 厚の Ti 窓を通して数 MeV, 14pC/ショットの電子を測定した。イメージングプレートによる測定により、横方向にガウス分布を持ち、電子源からそれぞれ約 9° および 7° の角度広がり (FWHM) を持つコーン状に放出されている電子ビームの生成を確認している。エミッタンスは数 $\pi\text{mm.mrad}$ と良好であった。また、高压ガスおよび高出力レーザーを使用した際には多成分空間分布を持つ電子ビームが観測されることを確認し、プラズマ不安定発生の可能性も示唆している。数値解析、実験、理論解、最近のフランスでの 20TW35fs レーザーによる実験結果との比較では、おおよその一致が確認され、12TW50fs レーザーでは数値解析で想定したプラズマ密度 $5 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ が、10fs、数 MeV 電子ビーム生成には最適であることが明らかになった。

第5章では上述の成果がまとめられており、本研究の総括が述べられている。要約すれば、12TW50fs レーザー単一でのガスジェットプラズマ相互作用による 10fs レベルの極短電子ビームの生成の2次元数値解析がなされた。そこではプラズマ航跡場碎波とレーザー電磁場によるプラズマから航跡場への電子入射は重要な役割を果たすことが判明した。実験では数 MeV, 14pC/ショット、数 $\pi\text{mm.mrad}$ の電子ビームを計測した。数値解析、実験、理論解との比較検討より、今後の世界に先駆ける 10fs 電子シングルバンチ実証のための最適実験パラメータを明らかにした。

以上のように、本論文における研究成果は、高い独創性を有しており、レーザープラズマ相互作用、および先進ビーム工学の研究分野では非常に有用なものである。また、システム量子工学の発展に寄与するところが大きいと判断される。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。