

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540512

研究課題名（和文） 高強度超短パルスレーザーによって駆動された電離波の構造と安定性に関する理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical study on structure and stability of ionization wave driven by intense ultra-short laser pulse

研究代表者

加藤 進 (KATO SUSUMU)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員

研究者番号：20356786

研究成果の概要（和文）：

高強度レーザーを用いた粒子加速では、レーザーとターゲットとの相互作用によって発生した大電流密度の高エネルギー電子ビームが中性媒質中を伝播する。この時に生成される電場によって中性媒質は急速に電離する。電離波面の構造形成における素過程の果たす役割を Tikhonchuk が提案した簡略化した 1 次元のプラズマ流体モデルを用いて調べた。その結果、電場による直接イオン化と二次電子による衝突イオン化の関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

An intense electron beam can be efficiently generated by intense short laser pulses. The interaction of an intense electron beam with a neutral background material is studied. The neutral material is ionized by the electrostatic field generated by the intense electron beam and electron impact ionization. The structure of the ionization front is analyzed using a one-dimensional model proposed by Tikhonchuk. The structure is determined primarily by electron impact ionization of the ionized background electrons. In addition, the field ionization contributes to the generation of the ionization front by increasing the density of the electron beam.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,124,680	337,404	1,462,084
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,124,680	937,404	4,062,084

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：電離過程、粒子加速、高エネルギー電子、高強度レーザー

1. 研究開始当初の背景

高強度超短パルスレーザーを用いることにより大電流の高エネルギー電子を発生することが可能になっている。特に、超短パルス高強度レーザー光を薄膜ターゲットに照射した場合、発生する電子ビームがターゲット

ト裏面にシース電場を作る。この電場によってイオンを高エネルギーに加速する手法が提案されている。このとき、発生する電場強度 E は、高エネルギー電子の密度 n と温度 T を用いて、 $E \sim (2nT)^{1/2}$ と評価される。 $n=10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T=100 \text{ keV}$ の場合、 $E > 10^9 \text{ V/cm}$ となり、この

電場強度中では、電離エネルギーが 100 eV 以下の原子やイオンに対する電離レートは 10^{15} s^{-1} 以上となる。

このため、高強度レーザーを用いた粒子加速や高速点火核融合においては、高エネルギー電子が絶縁体中を伝播することにより、中性媒質からプラズマへの伝播を伴う遷移過程で、急速な電離が生じ、電離波が励起される。その電離波が、プラズマの発展を支配し、最終的な粒子のエネルギー、量、品質を決定する本質的な役割を担う可能性がある。しかし、完全電離プラズマに比べて、電離を伴う中性媒質中での電子の伝播および電離波の性質については詳しく調べられておらず、その理解は遅れていた。

2. 研究の目的

高エネルギー電子ビームの中性媒質中での伝播に伴う電離波面の構造とその安定性を明らかにすることである。特に、電離を支配する基礎過程を特定することである。

また、中性媒質の電離に関連して、誘電体などの絶縁体がプラズマになる過程についての基礎的な物理についての検討も行う。

3. 研究の方法

電子ビームが中性媒質中を伝播することで生成される電場は、その媒質を急速に電離する。その電場による直接電離によって二次電子が生成されるので、電場によって加速された電子と取り残されたイオンとの間の分極電場によって静電場は遮蔽される。一方、生成された電子が遮蔽された電場内で加速または加熱されることにより、衝突過程による電離が進展すると考えられている。

高エネルギー電子ビームの中性媒質中での伝播は、それ自身が励起した電離波によって影響を受ける。本研究ではプラズマを構成する電子を、電子ビームを構成する高エネルギー電子と媒質の電離によって生成された二次電子との二成分に分離し、高エネルギー電子ビーム成分は電離波によって受ける変形は小さいと仮定する。この仮定に基づく電離を支配する素過程を考慮したプラズマ流体モデルを用いて、電離波面の構造形成における素過程の果たす役割を明らかにする。また、この電離面の安定性について、電子ビームに対する密度揺らぎを摂動として考慮することによる線形解析を行った。

4. 研究成果

はじめに、大まかな電離波の構造を決定するため、電場による電離過程を含んだ1次元粒子シミュレーションを行った。レーザー照射から 70 fs 後の電子の位相空間とイオン密度を図1に示す。このとき、レーザー強度とターゲット媒質は、 $1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ (立ち上がり

時間, 5fs), 密度 $1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ の炭素とした。高エネルギーの電子が中性媒質中を伝播することにより、 $1 \mu\text{m}$ 以下のスケールで電離が起こっている。

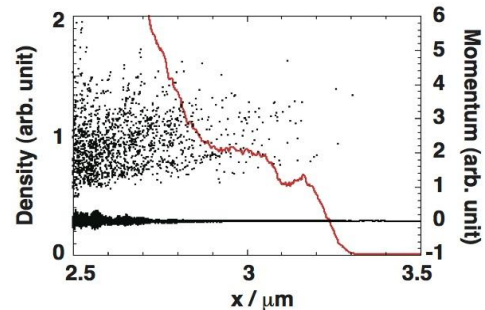


図1 電子の位相空間とイオン密度プロファイル。点は、空間と運動量からなる位相空間上の電子の位置を、赤線はイオン密度を示している。

次に、電離波面の構造形成における素過程の果たす役割を明らかにするために、電離過程を考慮したモデルとして、Tikhonchuk (2002) が提案した簡略化した1次元のプラズマ流体モデルを用いた解析を行った。このモデルでは、電子ビームと一緒に伝播する系における定常解を利用する。このとき次の3つの電離過程、(1) 高エネルギー電子ビームによる衝突電離、(2) 静電場による直接電離、(3) 静電場によって形成された背景電子による衝突電離、をモデルでは考慮する。電離の素過程として用いるモデルは、(2) の静電場による直接電離には Landau モデル、(3) の背景電子による衝突電離には、放電モデルで広く利用される Boltzmann 方程式に基づくモデルを用いた。このモデルは弾性散乱や非弾性散乱の素過程が比較的良く解っている原子・分子に関するモデルとしてはよく利用されている (Hagelaar, 2005)。この Boltzmann 方程式に基づくモデルを用いることにより、二次電子による電離係数に加えて、流体モデルで必要となる移動度を電子分布関数から決定することができる。

中性媒質としてネオンを考え、その密度を固体と同等の $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ とする。媒質中を伝搬する電子ビームは、そのエネルギーを 340keV と仮定し、その電子密度が (a) $0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と (b) $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の場合について考える。そのエネルギー密度は、 10^{15} Wcm^{-2} 程度となり、レーザーから高エネルギー電子への変換効率を数%と仮定すると、凡そ 10^{17} Wcm^{-2} のレーザー照射強度に相当する。このときの静電場とイオン密度のプロファイルを

図 1, 2 にそれぞれ示す. 図中の線色の違いは, 考慮した電離過程 (1-3) の違いを表

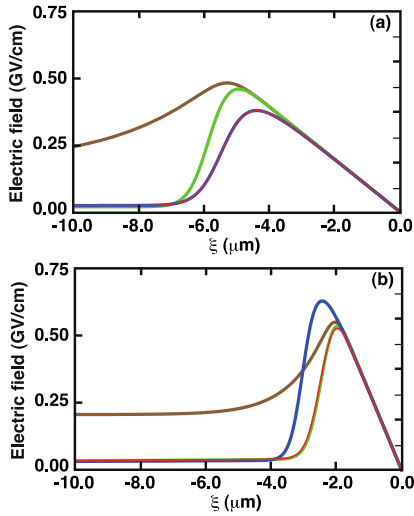


図 2 電離過程の違いによる電場の空間プロファイル. (a), (b) は電子ビーム密度が $0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の場合を示す. 赤, 青, 緑, 茶色の線は, 考慮に入れた素過程の違いを表している. 赤色はすべての電離過程, 青色は電子衝突による電離過程, 緑色は電場と背景電子による電離過程, 茶色は電場による電離過程のみを考慮している.

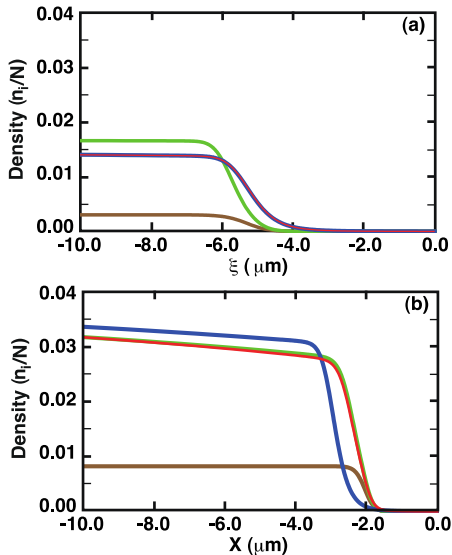


図 3 電離過程の違いによるイオン密度の空間プロファイル. 条件等は, 図 1 と同じである.

している. 赤線がすべての電離過程を考慮した結果である. その他の色は, 限られた電離過程のみを考慮している. 座標系を電子ビームが伝播する系にとったモデルを用いているので, 横軸の空間座標ゼロが電子ビームの先端を表し, マイナス方向に電子ビームが続いている.

電子ビームの密度が低い(a)の場合, 赤線と青線はほとんど一致しており, プラズマの密度プロファイルは電子衝突電離で決まり, 電場による直接電離の寄与はほとんどない. 一方, 電子ビームの密度が(a)に比べて3倍高い(b)の場合, 赤線と緑線はほとんど一致しており, 電場による直接電離と低エネルギーの背景電子による衝突電離の両方で, そのプロファイルは決まる. このように, 電子ビームの密度が3倍増加することで, 電離過程を支配する素過程が大きく変わることがわかる.

どちらの場合も, 電場による直接電離のみを考慮した場合は, 電離波面の後方での電離が進まず, 電場の遮蔽が不十分となる. 一方, 粒子シミュレーションの結果では, 電離波面後方でも進展しているが, これは, 粒子数が少ないことによる電場揺らぎが大きく評価され, ノイズの影響であると考えられ, 粒子シミュレーションを行う上で注意が必要である.

電離度が1%程度の弱電離プラズマが形成されることにより, 電子ビームによって生成された静電場が, 二次電子によるプラズマによって遮蔽されることで急激に低下して, 電離過程の進展が急激に押さえられる. その結果, その電離面の厚みは, それぞれ約 $2 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ である.

電離波面の安定性を議論するために, 2次元デカルト座標系を用い, 伝播方向に垂直な方向に対する摂動について線形解析を行った. 伝播方向に垂直な方向に摂動がない場合の解として, 前出の1次元の定常解を用いた. 電子ビームの密度を n_b , イオン密度を n_i^0 とその密度に対応する電子プラズマ周波数を ω_p^2 , 電離係数を ν とすると, 成長率は, 近似的に, $(1 - n_b/n_i^0)\omega_p^2/\nu$ と求まる. これより, イオン密度が電子ビームの密度を上回ると不安定となる. 図 2-3 での計算条件では, その成長距離を増幅係数が3となる長さとする, その長さは約 $1 \mu\text{m}$ となる.

密度揺らぎの成長が電離面の厚みと同程度となるので, 電子ビーム自身が変形を受けるなどの非線形な過程を考慮したモデルとその解析がより正確な解析には必要である.

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 1 件)

- ① Susumu KATO, Yasuaki KISHIMOTO, Eiichi TAKAHASHI and Akira SASAKI, Role of field and electron impact ionization in ionization front generated by an intense electron beam, Plasma and Fusion Research, 第 7 巻, 1204038 (2012) (査読有)
DOI: 10.1585/pfr.7.1204038

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 加藤 進 他, イオン化に伴う波面の構造と形成機構, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学 (広島県)
- ② 加藤 進 他, 電子ビームによって駆動された電離波面の安定性, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 28 日, クローバープラザ (福岡県)
- ③ 加藤 進 他, CW レーザーによる結晶損傷とプラズマ生成に関する素過程モデル, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 19 日, 横浜国立大学 (神奈川県)
- ④ 加藤 進 他, CW レーザーによる結晶損傷とプラズマ生成に関する熱解析, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学 (兵庫県)
- ⑤ 加藤 進 他, 電子ビームによって駆動された電離波の励起過程, Plasma Conference 2011, 2011 年 11 月 24 日, 石川県立音楽堂 (石川県)
- ⑥ 加藤 進 他, 電子ビームによって駆動された電離波の構造, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学 (新潟県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 進 (KATO SUSUMU)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員

研究者番号: 20356786