

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 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540414
 研究課題名（和文） 安定的レーザーチャネル下での光パラメトリック過程で生じる光パルスのダイナミクス
 研究課題名（英文） Dynamics of the laser field from parametric procedure at stable laser channeling condition
 研究代表者
 森 道昭 (MORI MICHIAKI)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職
 研究者番号：10323271

研究成果の概要（和文）： 安定的なレーザーチャネリング条件下でのダイナミクスについて調査した。モデル計算を使った考察から、レーザー強度が真空時の強度（ $\sim 9 \times 10^{17}$ W/cm²）に比べ 20 倍近くの 2×10^{19} W/cm² までエンハンスされている事が分かった。

研究成果の概要（英文）： We investigated the dynamics under conditions of stable laser channeling. From a consideration with the model calculation, it was found to be enhanced up to 2×10^{19} W/cm² near 20-fold compared to $\sim 9 \times 10^{17}$ W/cm² of the vacuum laser intensity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：fs レーザー・量子ビーム・T³ レーザー・プラズマ

1. 研究開始当初の背景

相対論的強度を持つレーザー電場とプラズマとの相互作用に関する研究は、フェムト秒のバンチ幅を持つ準単色電子ビームや MeV 級の高エネルギーイオンビームなどの高エネルギー粒子発生とその最適化に興味が集まっている。しかしレーザー駆動準単色高エネルギー電子発生において重要な役割を果たす誘導ラマン散乱は、非線形光学結晶を用いた光パラメトリック発振(OPO)や光パラメトリック増幅(OPA)としてよく知られている光パラメトリック過程の1つであり、これに

より生成される光パルスは、特に時間波形ではポンプレーザーとは全く異なる性質を持つ。したがって、この光の性質を十分に把握した上でそれを利用する事ができれば、従来光学系の損傷の問題から生成が困難だった超高強度レーザーでの例えば 10 フェムト秒級のパルス列や急峻な立ち上がりを持つパルスなどの特異な光パルスの生成が可能になり、非線形光学結晶を用いた光パラメトリック発振によって得られる光と同様、新たなレーザー光源として展開できると考えられ

る。

2. 研究の目的

研究代表者は、2008年にレーザー駆動フェムト秒電子バンチを応用した放射線化学反応に関する研究において、通常ヘリウムガスをターゲットとしてフェムト秒電子バンチを発生させるのに対し、高度にプレパルス制御した上でアルゴンガスを用いる事により、特定のプラズマ密度において光パラメトリック過程の1つである誘導ラマン散乱の安定性の向上と長尺化がもたらされる事を電子線の空間分布・安定性・エネルギースペクトルの結果から明らかにした。このような条件の下では10~15フェムト秒のパルス列が発生していると推測される。しかし多くの点が未解明であり最適化も進んでいない。本研究ではこの安定条件のメカニズムの解明を中心に研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 高 Z(アルゴン)ガスにおける電子ビーム安定化のメカニズムの解明

高 Z ガス(アルゴンガス)による安定的な電子ビーム生成のメカニズムを調べた。具体的にはターゲットパラメーター(低 Z(ヘリウム)/高 Z(アルゴン)のガス圧)を変化させ、安定性を含めた電子ビームのパラメーターの評価とトムソン散乱計測によるウェーク場の診断を通じ安定化のメカニズムの解明を行った。

(2) 電子ビーム発生の閾値の調査を通じた相互作用の評価

照射レーザーのピーク出力に対する電子ビーム生成の閾値のスケージングから、相対論的自己収束によって増強されるレーザー強度の間接的な評価を行った。具体的には、レーザー強度の変化に対応する、電子ビーム

の発生のプラズマ密度の閾値の変化量から、モデル計算を用いて相対論的自己収束によって増強されるレーザー強度を推計した。

(3) 2つの高 Z ガスにおけるレーザー伝搬の計測と光線追跡計算によるダイナミックスの評価

ガス種を変えることでレーザープラズマ相互作用のダイナミックスが大きく変わる。そこでネオンガスを用い、アルゴンガスと比較する形でレーザー伝搬の計測と光線追跡計算を通じ評価を行った。

4. 研究成果

(1) 高 Z ガスを用いた電子ビーム安定性の評価とそのメカニズム解明(論文②, ③)

実験セットアップを図1に示す。ここで照射レーザーは、前駆パルスのピークパワー・パルス幅は10MW/500ps、メインパルスのピークパワー・パルス幅は4TW/40fsで供給した。これを軸外し放物面鏡(OAP)にて $\phi 30\mu\text{m}(e^{-2})$ 径でガスターゲット上に集光した。したがってピーク強度はそれぞれ $2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 、 $9 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ に相当する。一方、ガスターゲットはパルスガスジェットを通じてスケール長3.5mm(半値全幅)で集光点近傍に供給した。ここで低 Z・高 Z ガスの違いを評価するために、低 Z ガスとしてヘリウム・高 Z ガスとしてアルゴンを用いた。また、ガス密度はヘリウム・アルゴンでそれぞれ $2.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に設定した。これは、 $9 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ のメインのピーク強度でのBSIモデルから推測される電離価数の評価から、プラズマ電子密度に換算して双方ともほぼ $4.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ に相当する。これを電磁石・蛍光板・CCDカメラで構成するエネルギー分析器(ESM)で計測した。このESMは電磁石で構成しているため印可磁場をゼロにして電子線のイメージを計測した。

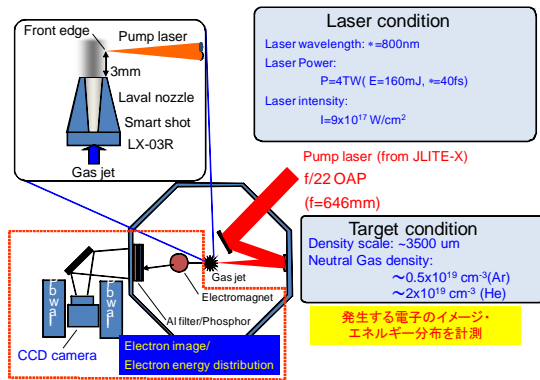


図1 実験セットアップ

まず電子ビームの放射方向の安定性を評価した。図2に実験結果を示す。これはヘリウム・アルゴンそれぞれのターゲットでの電子ビームのショット毎の位置を比較したものである。この結果より、電子ビームの位置安定性が4倍以上(9.8mrad(rms)→2.4mrad)向上している事が分かった。さらにビーム発散角においても1/3に抑制(29.8±8.8mrad→10.8±2.4mrad)されている事も分かった。一方、電子加速の媒体となるプラズマ波のスケール長さをトムソン散乱計測を通じて評価した。その結果、アルゴンターゲットはヘリウムターゲットに比べて3倍以上長くなる事を観測しており、この長尺化によって安定性の向上がもたらされている事が分かった。

この結果について考察した結果、前駆パルスによる光導波路の形成が関与している事が分かった。フェムト秒テラワットレーザー光はそれを集光させると、トンネル電離もしくは多光子電離によってプラズマが発生する。しかし実際のレーザー装置で生成されるレーザーパルスはASE (Amplified Spontaneous Emission) ペDESTALと呼ばれるレーザー光増幅過程で副次的に生じる前駆パルスを含んでいる。この前駆パルスは通常ピコからナノ秒の時間スケールでメインピークに比べ5~7桁程度低い強度を持った

め、これが十分に抑制されていないと、メインパルス到達前にターゲットを加熱させ、場合によってはプラズマ化を引き起こす。

この前駆パルスにおいて支配的となる電離過程は多光子電離とそれに続くカスケード電離である。この電離はレーザーパルス(プレパルス)の強度・パルス幅に依存するとともに、高Zガスは低Zガスと比較して特に低い第1電離閾値を持つため、より低いレーザー強度で電離が生ずる。この前駆パルス(パルス幅500ps, 強度 2×10^{12} W/cm²)によるカスケード電離の閾値はヘリウムおよびアルゴンそれぞれ 4×10^{12} W/cm² および 9×10^{11} W/cm²と見込まれる。したがって、この条件ではアルゴンガスターゲットにおいてのみ電離が生じていると推測される。このような電離状態はプラズマの密度勾配をもたらし、レーザー光導波路を形成する。つまり、中心部で低く周囲で高いプラズマ電子密度分布が形成される事により、屈折率に勾配を持つグレーデッドインデックス型光ファイバーと同等の状態が形成され、それをガイドとした光導波路が形成される。前述のカスケード電離とプラズマの拡散によって生じるレーザー

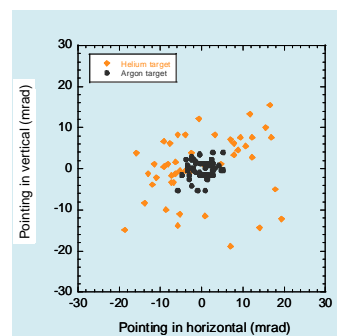


図2 電子ビームの位置安定性の比較

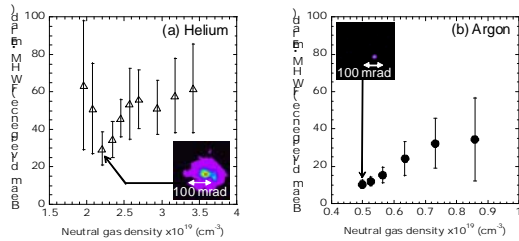


図3 電子ビームの発散角の比較

断面方向に生じるプラズマ電子密度の窪みは、高々10%程度と見積もられる。しかし、これは、Sprangle が提示している光導波路形成の条件を十分に満たす。このことから、特にアルゴンターゲットにおいて長尺のウェーク場の生成とそれに伴う電子ビームの安定化が得られたものと推測される。

(2) 電子ビーム発生 の 閾値 の 調査 を 通 じ た 相 互 作 用 の 評 価 (論 文 ①)

テラワットレーザー照射による電子線発生において、レーザーパワーとプラズマ密度をパラメーターとする閾値が存在する。この関係を用いる事で相対論的自己収束によるエンハンスされたレーザー強度を間接的に評価することができる。そこで、照射レーザーのパワーを変化させこの評価を行った。具体的には、(1)と同じ実験セットアップでレーザー出力4TWと3.6TWの2種類における電子線発生 の 閾 値 を 調 べ た (図 4) 。 ターゲットガスはアルゴンを用いた。その結果、インжекションの条件が相対論的自己収束によって決定されることを実験結果から明らかにするとともに、モデル計算を使った考察から、レーザー強度が真空時の強度($\sim 9 \times 10^{17}$ W/cm²)から20倍近くの 2×10^{19} W/cm²にエンハンスされている事が分かった。

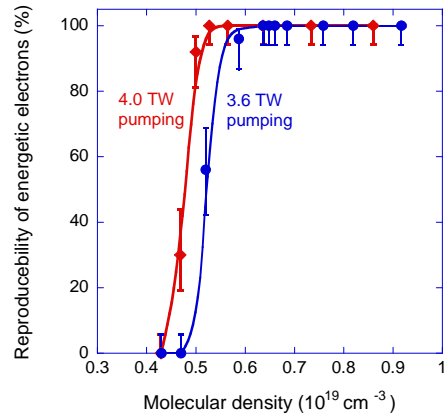


図4 電子ビーム発生 の 再 現 性 (>1pC/>1MeV)

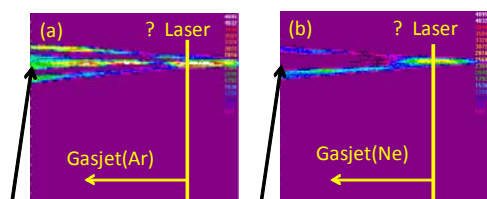
(3) 2つの高Zガスにおけるレーザー伝搬の計測と光線追跡計算によるダイナミクスの評価

高Zガスが水素やヘリウムなどの低Zガスと大きく異なるポイントの1つは多段にわたる微細な電離構造である。一方、ガスターゲットは空間的に広がりを持った密度分布を持つため、ピーク以外のフットの部分も含めてレーザープラズマ相互作用を含めて議論する必要がある。この研究では、ガスをアルゴンターゲットとネオンターゲットの2種類で比較を行い、この効果について調査した。

実験セットアップは(1)および(2)同様の構成で、また励起レーザーおよびターゲットの条件も(1)と同じで行った。設定した中性ガス密度は双方とも 5×10^{18} cm⁻³および 6×10^{18} cm⁻³である。これは、 9×10^{17} W/cm²のメインのピーク強度から推測される電離価数から換算して双方ともほぼ 4.5×10^{19} cm⁻³に相当する。

しかし、実験の結果はネオンにおいて有意な電子線(>1pC for >1MeV)の生成は認められなかった。そのため、中性ガス密度 5×10^{19} cm⁻³までガス密度を増やす試みも行った。このことは、相対論効果による凸レンズ効果が増え

るため、電子ビーム発生条件の緩和に繋がるが、有意な電子ビームの発生は認めなかった。この現象を調べるために、横方向からの光プローブ(パルス幅 40fs)を行いメインパルスの伝搬している状況を調べた。図5にアルゴンとネオンそれぞれのレーザー伝搬の様子を示す。この計測から、アルゴンにおいて生じていた相対論的自己収束がネオンにおいて生じていないことが分かった。



収束性の高いレーザー伝搬 収束性の低いレーザー伝搬

図5 レーザー伝搬の比較

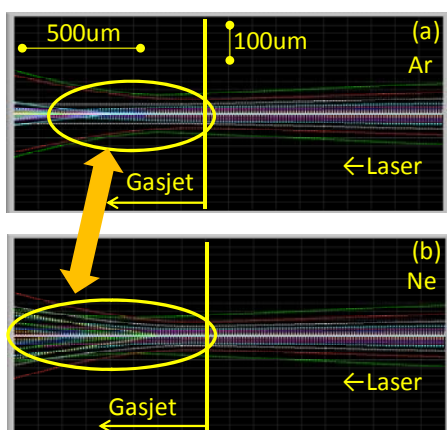


図6 光線追跡計算の結果

この実験結果を定量的に解析するために、相対論的自己収束による凸レンズ効果とプラズマによる凹レンズ効果がレーザーの伝搬にどのような影響を与えるか光線追跡計算による評価を行った。図6に計算結果を示す。電離の価数の評価にはBSIモデルを用いた。その結果、ネオンターゲットではレーザー光が相対論効果による凸レンズ効果よりもプラズマの屈折による凹レンズ効果が支

配的に影響するため、レーザー強度のエンハンスメントが抑制され、結果的に電子線の発生が妨げられている事が分かった。またその原因として、電離の構造が影響していることも分かった。図7にヘリウム・ネオン・アルゴンそれぞれのトンネルイオン化閾値を示す。ネオンターゲットはアルゴンターゲットと比較し、 10^{17}W/cm^2 を超える強度まで電離の階層が連なっているおり、そのことが強力な凹レンズ効果に結びついているものと推測される。特にレーザーが集光途中のガスのフットの部分では、相対論的自己収束の効果が低く、それも相まってビームの発散につながっていると考えられる。このように高Zガスとレーザーとの相互作用においては、このガスのエッジ部分でのレーザープラズマ相互作用を勘案する必要がある事がわかった。尚、よりレーザー強度の高い実験において、ネオンターゲットにおいてもレーザーチャネリングと高エネルギー電子の生成を観測しており、この考察の妥当性を補足する結果が得られている。

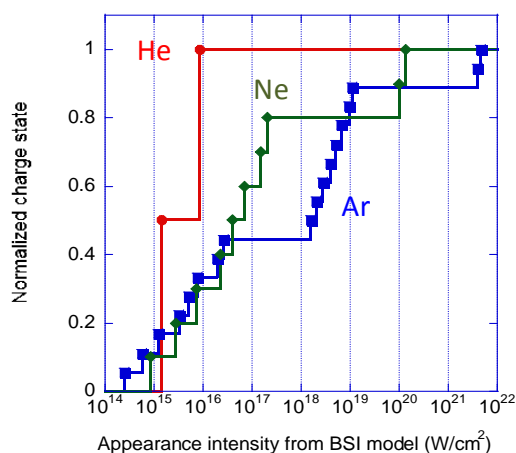


図7 イオン化閾値の比較

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3件)

① Michiaki Mori 他, Condition of MeV electron bunch generated from Argon gas-jet target in self-modulated laser wakefield regime, Journal of Physical Society of Japan, 80 10501(2011). DOI: 10.1143/JPSJ.80.105001

② 森 道昭, 近藤公伯, High-Z ガスを用いた準単色電子ビーム特性の安定化, プラズマ・核融合学会誌, 86 147(2010).

③ Michiaki Mori 他, Generation of stable and low-divergence 10-MeV quasimonochromatic electron bunch using argon gas jet, Physical Review Special Topics Accelerator and Beams, 12 082801(2009). DOI:10.1103/PhysRevSTAB.12.082801

[学会発表] (計 10 件)

① 森 道昭 他, SM-LWFA 領域での MeV 級電子ビーム発生におけるレーザー出力・プラズマ密度の条件, 日本物理学会, 平成 24 年 3 月 27 日, 関西学院大学

② 森 道昭 他, Density-ramp injection における Sub-MeV から 30MeV 超への追加速, 日本物理学会, 平成 23 年 3 月 28 日, 新潟大学

③ 森 道昭 他, レーザー駆動 Sub-MeV 級準単色電子線発生と 40MeV 級への追加速, プラズマ・核融合学会, 平成 22 年 12 月 1 日, 北海道大学

④ 森 道昭 他, 3TW レーザーと気体の相互作用による Sub-MeV 級準単色電子ビーム発生, 日本物理学会, 平成 22 年 9 月 23 日, 日本物理学会

⑤ Michiaki Mori 他, STABILIZATION OF LASER ACCELERATED ELECTRON BUNCH BY THE IONIZATION-STAGE CONTROL, International Particle Accelerators Conference 2010, 2010 年 5 月 26 日 Kyoto, Japan

⑥ 森 道昭 他, レーザープラズマ加速におけるガス種最適化による高エネルギー化・電子ビーム制御性向上, 日本物理学会, 平成 22 年 3 月 22 日, 岡山大学

⑦ 森 道昭 他, J-KAREN レーザーを用いた 7MeV 級陽子線発生, レーザー学会, 平成 22 年 2 月 3 日, 千里ライフサイエンスセンター

⑧ 森 道昭 他, J-KAREN レーザーを用いた高エネルギープロトン加速研究, 応用物理学会, 平成 21 年 9 月 11 日, 富山大学

⑨ Michiaki Mori 他, Studies at the Photo-Medical Research Center in Japan, Laser and Plasma Accelerators Workshop 2009, 平成 21 年 6 月 23 日, Kardamyli, Greece

⑩ Michiaki Mori 他, Stabilization of laser accelerated electron bunch using high-Z gas-jet target in a self-injected regime, Laser and Plasma Accelerators Workshop 2009, 平成 21 年 6 月 23 日, Kardamyli, Greece

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 荷電粒子加速方法及び荷電粒子加速装置、粒子線照射装置、医療用粒子線照射装置

発明者: 森道昭, 近藤公伯, 神門正城, 小瀧秀行, セルゲイブラノフ, 大道博行, 田中和夫, 西村博明

権利者: (独)日本原子力研究開発機構

種類: 特願

番号: 2009-265011

出願年月日: 2009 年 11 月 20 日

国内外の別: 国内

○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

森 道昭 (MORI MICHIAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究職

研究者番号:10323271