

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15日現在

機関番号：14401
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22740364
 研究課題名（和文）
 レーザー縦電場による直接電子加速
 研究課題名（英文）
 Particle acceleration by longitudinal electric fields
 研究代表者
 末田 敬一（SUEDA KEIICHI）
 大阪大学・大学院工学研究科・特任講師
 研究者番号：90448077

研究成果の概要（和文）：

レーザー光の縦電場を利用して電子の直接加速を試みた。加速用レーザーの高出力化・短パルス化、大型軸対称偏光制御板の製作、および多焦点集光レーザーによる相互作用長の擬似的伸張により、電子加速への有用性を確認した。また、3次元相対論的粒子コードを開発し、それによって偏光制御された超短パルスレーザーを用いることで、単色に近い電子加速が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We investigated laser electron acceleration induced by longitudinal electric fields without using a plasma wave. We have developed axially symmetric polarizing plates with large aperture, high power laser systems and quasi-phase matching by using multifocal phase plates. As a result, we confirmed the effectiveness of longitudinal electric fields.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：レーザー、粒子加速

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：粒子加速、レーザー、位相・偏光制御

1. 研究開始当初の背景

近年、従来の加速器などで生成されていた高エネルギーの荷電粒子（電子、高速イオン等）を、レーザー光を用いて発生させる研究が盛んに行われている。高強度・短パルスのレーザー光を低密度のガスターゲットに集光すると、通常の加速器に比べ、強い加速電場勾配（数百GV/m）を生成できる。このため、加速器を大幅に小型化でき、従来の大

型施設を用いることなく、小さな装置で電子・イオンの加速やX線、ガンマ線発生の可能性が見込まれる。これらの量子ビームは、高輝度、低エミッタンスなど、従来の放射線にない特徴を持っており、高エネルギー物理学などの基礎科学領域のみならず、小型で安価な癌治療装置など、レーザー加速には様々な分野における新たな活用が期待され、その加速エネルギー向上が待ち望まれている。

空間的に偏光を制御した光の中で、レーザ

一光断面内において光軸を中心に対称な電磁場ベクトルを持つビームとして軸対称偏光ビームが知られている。とくにラディアル偏光ビームは光軸に垂直方向に電場（横電場）が対称に振動し、その結果、集光スポットでは光軸に平行に振動する電場（縦電場）が横電場と同程度の強度で発生する。一般的な直線偏光ではこの成分はほとんど存在しない。従来の直線偏光を用いた加速方法では、電場の振動方向と電子加速方向が異なるため、プラズマ波である航跡場に一旦変換し、その電場で加速する必要があり、加速電場勾配低下の原因となっていた。それに対して縦電場では、電子の加速方向と電場の振動方向が一致するため、レーザーエネルギーの直接利用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、レーザーの縦電場を利用して粒子の直接加速による加速エネルギーを増大させることである。レーザー加速によって得られる荷電粒子（本研究では電子）の加速エネルギーは、加速電場勾配×加速（相互作用）距離で与えられる。そこで本研究ではレーザーの縦電場を用い加速電場勾配を増やし、レーザー光の位相と偏光を制御することで位相整合条件の最適化を行い加速長の増大させ、さらにレーザー出力そのもの高出力化を行って、それらを合わせて加速エネルギーの増加を目指す。

3. 研究の方法

縦電場による粒子加速の有用性の原理実証を目的として、(1)加速実験用レーザーの高出力化および短パルス化、(2)真空中での使用を考慮した縦電場発生のための大型軸対称偏光制御板の製作、(3)相互作用長を擬似的に伸ばす多焦点集光レーザーを発生させるための位相板の開発、(4)加速エネルギーの理論的予測を目的として、縦電場を扱える3次元相対論的粒子コードを開発し数値シミュレーションを行った。加速実験用レーザーの高出力化については、半導体レーザー励起 Nd:ガラスレーザー増幅器によるチャープパルス増幅を行った。

4. 研究成果

(1) 加速実験用レーザーの高出力化および短パルス化

①高出力化

中心波長 1053nm で動作するファイバーレーザー ($\Delta\lambda=10\text{nm}$) を種光として、パルス

伸張とパルスピッキングをした後、シングルモードファイバーで $1\mu\text{J}$ まで増幅を行った。増幅されたパルス光は、大口径ファイバー増幅器列（偏波保持型 Yb 添加 LMA ファイバー（コア径 $30\mu\text{m}$ ）とフォトニック結晶ロッド型ファイバー（コア径 $100\mu\text{m}$ ）で構成）により 1mJ まで増幅を行った。図 1 にその外観を示す。これら前置増幅部は出力の安定性の観点から全ファイバーシステムで構成した。

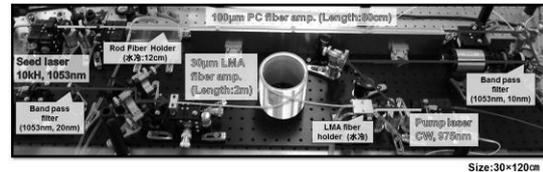


図 1: LMA ファイバー及びロッドファイバー増幅器の写真。

各々のファイバー増幅器を 30W および 100W（中心波長 975nm）の LD で励起したときの増幅特性を図 2 に示す。1kHz 励起において $1.4\text{mJ}/\text{パルス}$ （ナノ秒パルス CPA では最高レベル）を達成し、それを回折格子対でパルス幅 300fs まで圧縮した。さらに、BBO 結晶による 2 倍高調波変換では変換効率 30%（出力安定性 1.5% rms）を達成した。

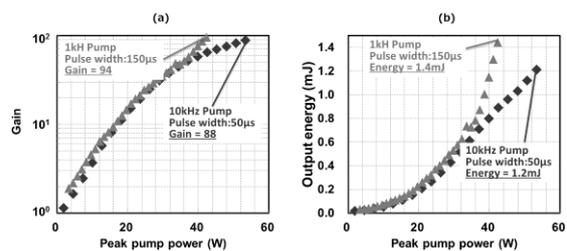


図 2: ファイバー増幅器の増幅特性 (a) $30\mu\text{m}$ コア LMA, (b) $100\mu\text{m}$ コアロッド型ファイバー。

ファイバーレーザーの最大の利点である安定性と高ビーム品質について評価した。図 3 に出力パワーの変動を示す。励起方式をパルス励起方式 (1kHz) にし、発熱による温度擾乱を抑制することで出力変動は 2.6% p-V、

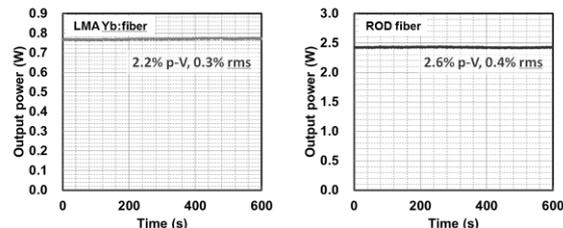


図 3: ファイバー増幅器の出力安定性。

0.4% rms と安定しており、市販 YAG レーザー励起の OPA に比べて 1 桁以上の安定性改善が得られた。

次に上述したファイバー前置増幅器からの出力をサブ 10 J 級のエネルギーまで増幅するために LD 励起 Nd:ガラスレーザー増幅器によるチャープパルス増幅を行った。増幅器は、均一な強度分布の高品質ビームを高い抽出効率で取り出すために複数の像転送光学系と、熱による歪みを解消するための増幅媒質内でのジグザグパスで構成される。図 4 に LD 励起に対する出力エネルギー特性を示す。0.1Hz 動作時で出力エネルギー 2.4J/パルス を達成した。チャープパルス幅を広げることにより、さらなる高出力化が可能である。また、これら増幅パルスを大口径回折格子によるパルス圧縮器を行った結果、2.4ps のパルスが得られており、現在このレーザーを用いて縦電場による加速実験を行っている。

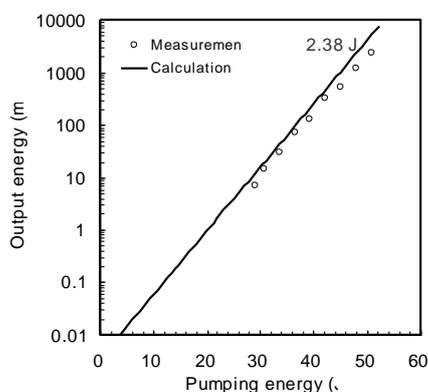


図 4: LD 励起に対する出力エネルギー特性。

②短パルス化

一方、後述する数値シミュレーションの結果、偏光を制御したパルス幅 10fs 以下のレーザー光を用いることで単色に近い電子加速が可能であることが明らかとなった。この結果を踏まえてパルス幅が 5fs 程度の光源開発を行った。種光源としてパルス幅 120fs、

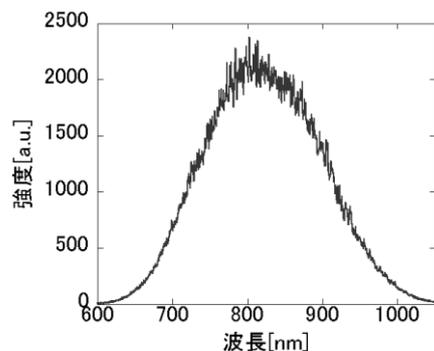


図 5: 出力スペクトル。

中心波長 790nm のレーザーを用い、サファイア結晶で 1200nm 帯の白色光を発生させた。これを信号光として BBO 結晶を用いて基本波の励起により非同軸 OPA を行った。アイドラー光の帯域幅を数 10nm に抑えることによってスペクトル角度分散を低減し、帯域幅をさらに広げるために、追加の無添加 YAG 結晶に集光し、図 5 に示すように超広帯域 (スペクトル幅 270nm (FWHM)、フーリエ変換限界パルス幅 ~ 5 fs に相当) の安定化光源を開発した。

(2) 大型軸対称偏光制御板の製作

縦電場を発生させる方法にはいくつかあるが、軸対称の旋光性をもつ液晶分子を配向した素子を用いることが簡便でモード変換効率の良い手法であり、これまでの研究で実現してきた。ただ液晶分子を用いた場合、分子の閉じ込め方の性質上、真空で用いることが困難であった。この問題を解決するために、今回新たに偏向子分割型 (8 セグメント) の大口径 (有効径 80mm) の製作を行った。

(3) 多焦点集光レーザーによる相互作用長の擬似的伸張

これまでの研究により、縦電場が加速勾配を増大させるのに有用であることを確認したが、そのまま単純に集光しただけでは電子加速には利用できない。縦電場の位相速度が光速を超えており、電子をその加速位相に乗せることができないからである。この問題を解決するために、周期的な密度の粗密分布をもつプラズマチャンネルを形成し、その密度変調によって擬似的に位相整合を行うことを目的として、多焦点集光レーザーを発生させるための偏光・位相制御板の製作を行った。図 6 に多焦点集光用位相制御板の位相分布パターンを示す。

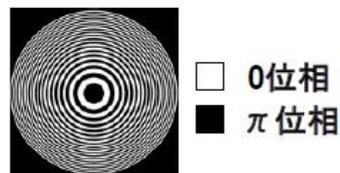


図 6: 多焦点集光用位相制御板

(4) 3次元相対論的粒子コードを用いた縦電場による加速の数値シミュレーション

縦電場とプラズマの相互作用を研究するために 3次元相対論的粒子コード (PIC) の開発を行った。図 7 は、10fs、 10^{18} W/cm² の偏光制御レーザーパルスが低密度ガス中を伝搬

する様子を調べたものである。伝搬に伴ってバブルが生成され、単色に近い電子（この計算では約 8MeV）が加速されることが観測された。

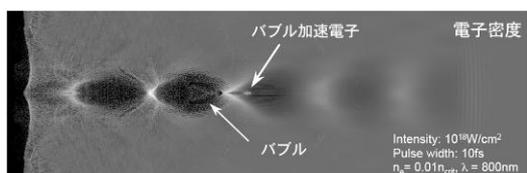


図 7: 偏光制御超短パルスにより低密度ガス中に生じる単色加速電子。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

① T. Kurita, K. Sueda, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, *Optics Express*, Vol. 18 Issue 14, pp. 14541-14546 (2010) 査読あり

〔学会発表〕（計 5 件）

① 荻野 純平, 末田 敬一, 栗田 隆史, 川嶋 利幸, 宮永 憲明, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 16 日, 東京.

② J. Ogino, K. Sueda, T. Kurita, T. Kawashima and N. Miyanaga, IFSA2011, September 12, 2011, France.

③ K. Sueda, J. Ogino, T. Kurita, T. Kawashima and N. Miyanaga, IQEC/CLEO Pacific Rim, September 1, 2011, Australia.

④ 荻野 純平, 末田 敬一, 栗田 隆史, 川嶋 利幸, 宮永 憲明 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学学会学術講演会, 2011 年 8 月 30 日, 山形.

⑤ 栗田隆史, 末田敬一, 椿本孝治, 宮永憲明, 第 71 回 応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月 16 日, 長崎.

⑥ K. Sueda, T. Kurita, Y. JIANG, T. Kawashima and N. Miyanaga, International Symposium on Ultra-fast Phenomena and Terahertz Waves (ISUPTW 2010), September 12, 2010, China.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末田 敬一 (SUEDA KEIICHI)

大阪大学・大学院工学研究科・特任講師

研究者番号：90448077