

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561023

研究課題名(和文)位相共役光によるレーザー核融合用自動ステアリング技術開発

研究課題名(英文)Beam Steering for Laser Fusion by Phase Conjugation

研究代表者

吉田 弘樹(Yoshida, Hiroki)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90230755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：位相共役鏡として四光波混合(Four-Wave Mixing: FWM)を用いる方法を提案し、それによるビームステアリングに関する研究をまとめた。レーザー核融合に用いられているポリスチレンフォームターゲットによるプローブ光の散乱・反射モデルとプローブ光照射系、FWMによるPC光の補正とフォームターゲット散乱反射光によるFWMに関する知見が得られた。また、FWMを用いたビームステアリングに要求されるインジェクション精度に関して、具体例として大阪大学の激光XII号のパラメータを採用し、FWMの導入に際して求められる設計仕様について検討した。

研究成果の概要(英文)：Four-Wave-Mixing (FWM) as a Phase Conjugate (PC) mirror for a beam steering method of inertial laser fusion was proposed. Knowledge about a model of scattering/reflection of probe beam, its optics, compensation of a PC beam by FWM, and FWM of scattering/reflection by foam target was obtained. Required injection accuracy of design specifications for a case of introduction of FWM for the Gekko XII laser system at Osaka University was studied.

研究分野：慣性核融合

キーワード：レーザー核融合 ターゲットインジェクション トラッキング ビームステアリング

1. 研究開始当初の背景

レーザー核融合発電では、ターゲットを炉に射出し、そのターゲットにレーザー光を照射することで核融合を行う。現在、日米欧露での研究では科学的ブレイクスルーと言われるエネルギー発生段階から次の工学実証をも手がけられている。そこでは、射出ターゲットによる核融合は行われておらず、ターゲット射出・ビームステアリング技術の開発が急務となっている。ターゲットと射出の仕様は現在、直径:4mm、速度:300m/s、繰り返し数:10Hzとなっている。ターゲットの射出精度を、核融合に要求される誤差凡そ 20 μm 以下に抑えることは困難であるため、レーザー光のステアリング装置が必要となる。その方法として主に可動ミラーを用いる方法と位相共役光を用いる方法がある。

前者の方法では、高精度なターゲットの位置検出・予測装置、100kg を超える大型のミラーの 10Hz での駆動が要求される。大型のミラーの高速駆動は容易ではなく、また、位置検出・予測装置のため装置全体が複雑になる。

後者の方法は、位相共役光という非線形現象に着眼した方法である。位相共役鏡とは位相共役鏡によって発生する光のことである。一般の鏡では散乱された光の位相は鏡への入射光と同じ位相であるが、位相共役鏡では散乱光(位相共役光)の位相は入射光の位相が反転したものとなり、またその散乱光は後方散乱波である。位相反転と後方散乱の特性を利用すると、まず、ターゲットにプローブ光としてターゲットにダメージを与えない程度の弱いレーザー光を照射し、ターゲットからの散乱光を位相共役鏡で散乱させると、位相共役光はターゲットに散乱された位置に正確に戻る。そのため、大型ミラーによる方法に必要なターゲットの位置検出・予測装置が不要となる。しかし、ターゲットは 300m/s の速度で射出されるので、ターゲットにプローブ光が照射されてから位相共役光が照射されるまでにターゲットの位置がずれるという問題がある。

現在、位相共役光を発生する方法として SBS(Stimulated Brillouin Scattering) が用いられており、静止したベアリング球での位相共役光照射が実現している。また、ターゲットの位置がずれる問題に関しては、韓国の研究者によって行われている。実際の核融合ではターゲットにレーザー光を照射する直前に第二次高調波へと変換するため、屈折率の波長依存性を利用すれば高調波の光路をずらすことができ、これも静止したベアリング球にて実験が行われている。

2. 研究の目的

他の研究機関で行われてきた SBS 位相共役鏡によるステアリング方法ではプローブ光一本から爆縮用レーザー光が一本しか得られないため、爆縮用のレーザーの本数だけ

プローブ光が必要になる。本研究で注目した四光波混合では任意の散乱角の散乱光により位相共役光が得られるため、プローブ光四本のモデルを提案する。このモデルでは三次元のターゲットによる散乱光強度分布をモデル計算と実験で明らかにする。

他の研究機関で行われている屈折率の波長依存性を利用した位相共役光の光路の調整用の素子もまた光学系を複雑にする要因となっている。本研究で採用する四光波混合はその様な素子を使用しなくとも、位相共役光の光路を調整することができる事を実証する。

他の研究機関で用いられてきたターゲットは静止したベアリング球であったが、本研究では、実際の核融合で用いられるポリスチレンのターゲットを運動させて、位相共役光照射実験を行う。

大阪大学のレーザー装置 12 号の光学パラメータを使用し、ターゲットの位置によって散乱・反射光が FWM セルに到達する散乱角がどのように変化するかを検討する。

3. 研究の方法

フォームターゲットによるプローブ光の散乱・反射

図 1 にフォームターゲットのモデルを示す。最外殻はポリビニルアルコール層、次にフォームポリスチレン層があり、その下に Deuterium-Tritium (DT) Solid 層、DT Gas がある。このターゲットにおいて以下を仮定する：

- ・ターゲットに照射するレーザー光の空間・時間的強度分布は一定。
- ・レーザー光はターゲットの最外殻表面で反射され、これはフレネルの法則に従う。
- ・反射されなかったレーザー光はフォームポリスチレン層によって完全散乱される。
- ・ターゲットによる吸収、透過は無視できる。
- ・ポリスチレンフォーム層からのレーザー光のターゲット最外殻表面での反射は無視する。

フォームターゲットからのプローブ光の散乱・反射光の角度依存性をモデル計算、および、He-Ne レーザーを用いた実験にて明らかにする。

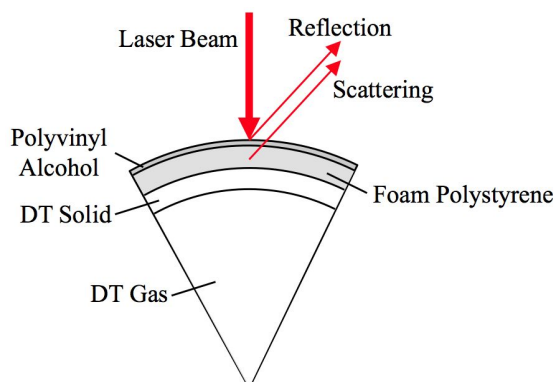


図 1 フォームターゲット散乱・反射モデル

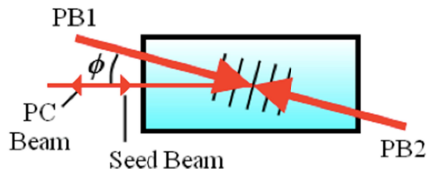


図2 縮退四光波混合の基本的概念

四光波混合による位相共役光の光路補正

図2に縮退四光波混合の基本的な概念図を示す。2本のポンプ光(Pump Beam: PB1, PB2)が対向照射しており、そのポンプ光の相互干渉領域にPB1から角度 ϕ だけ傾いたシード光を照射させると、PC光がシード光の逆方向に発生する。4本のビームはすべて同じ波長であり、この時、それぞれの波数ベクトルは以下の関係を満たす：

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4$$

下付文字の1, 2, 3, 4はそれぞれPB1, PB2, シード光, PC光を示す。

図3に四光波のベクトルを示す。(a)はポンプ光が対向している場合、(b)はPB2を垂直方向に d だけ傾けた場合であり、PB2の垂直方向の角度と同じ角、位相共役光PCが傾くことが分かる。

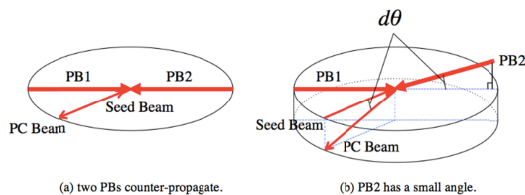
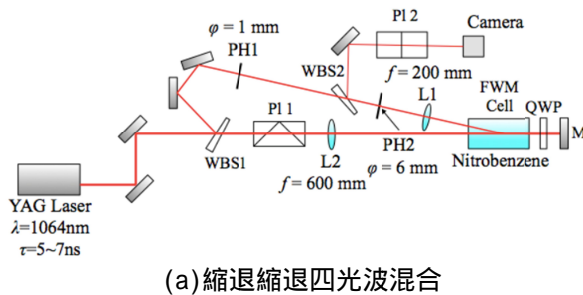
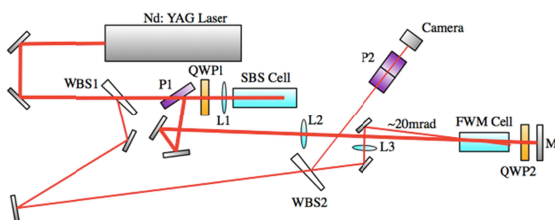


図3 四光波のベクトル図

図4に示す縮退四光波混合とブリルアン増強四光波混合において、PB2を調整することによりPC光が補正できることを、運動しているフォームターゲットへの位相共役光照射実験によって実証する。



(a) 縮退縮退四光波混合



(b) ブリルアン増強四光波混合

図4 位相共役光照射実験

大阪大学のレーザー装置激光XII号の光学パラメータを使用した散乱角の検討

図5に検討した激光XII号の光学システム図を示す。光線行列を使って、フォームターゲットからの散乱光の伝搬をシミュレーションする。

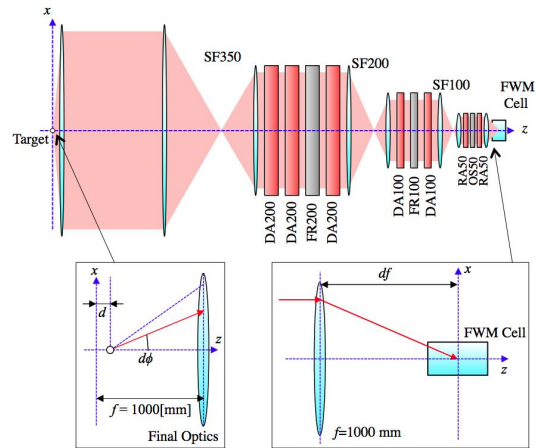
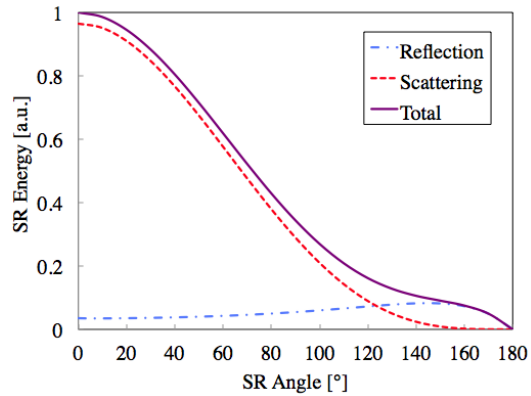


図5 激光XIIの光学システム図

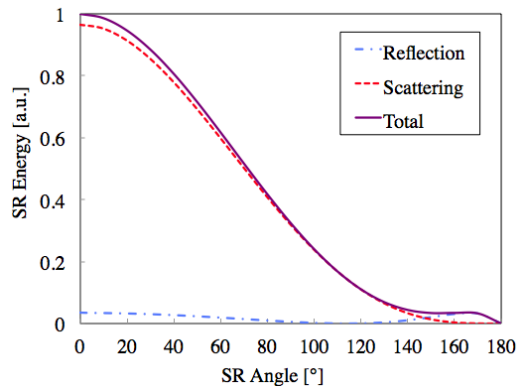
4. 研究成果

フォームターゲットによるプローブ光の散乱・反射

ターゲットの大きさが無視できる時、単位立体角当たりのSR光エネルギーはと表せる。図6に規格化した散乱成分と反射成分の入射角度特性を示す。(a)には入射光がs偏光、(b)にはp偏光の特性を示す。



(a) s 偏向



(b) p 偏向

図6 フォームターゲット散乱・反射モデルによる散乱成分と反射成分の入射角度特性

また、図7にHe-Neレーザーを用いて実験的に得たフォームターゲットからの散乱成分と反射成分の入射角度特性を示す。

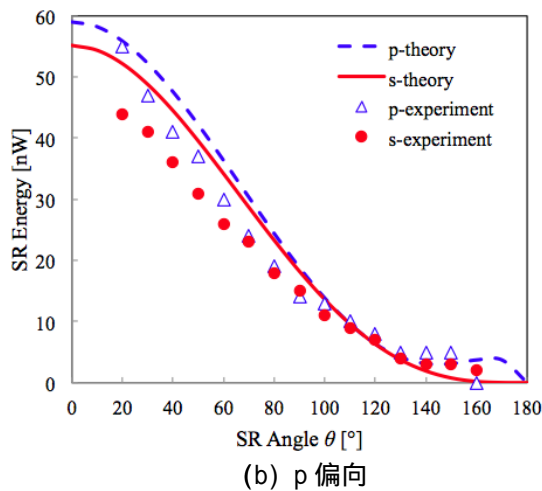
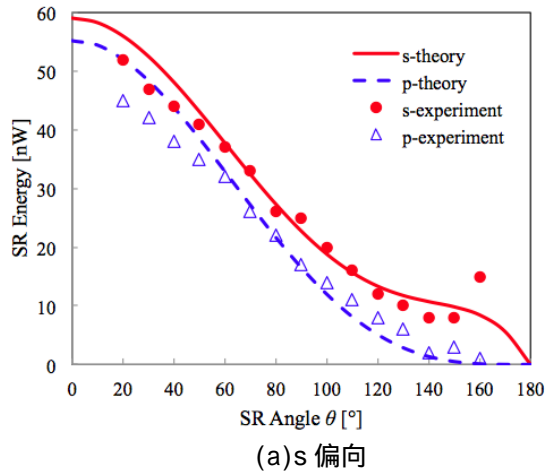
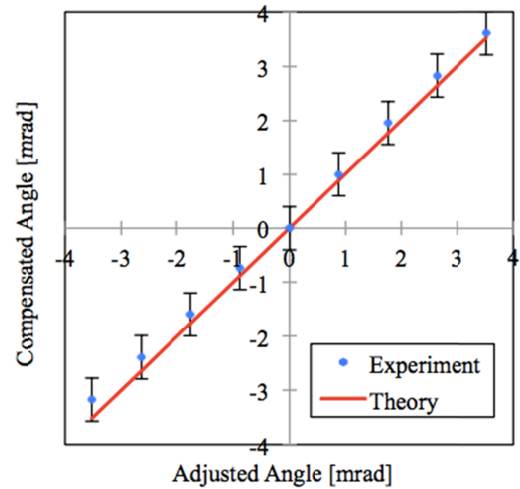


図7 フォームターゲットからの散乱成分と反射成分の入射角度特性

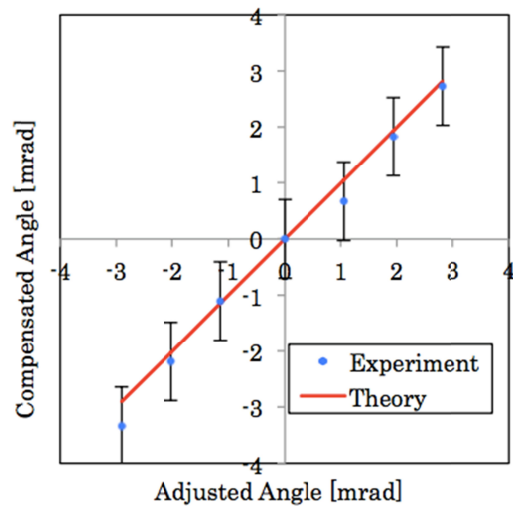
両偏光とも浅い角度では理論値より低いが、散乱光に含まれる両偏光成分の傾向は誤差約15%で合っており、使用したカロリメータ(SANWA OPM35S)の誤差は5%である。散乱角度が小さい領域の実験値が理論値より低いのは、実験で用いたターゲットが1 mmと小さく、またその厚さが100 μm程度と薄いため、完全に散乱されずに透過する成分もあるためと考えられる。実際の核融合プラントで使用されるターゲットは4 ~ 6 mmと言われているため、この透過光は発生しないと考えられる。

四光波混合による位相共役光の光路補正

図8に縮退四光波混合とブリルアン増強四光波混合における位相共役光の光路補正実験結果を示す。何れも、理論値とおりに位相共役光の光路が補正できる事が実証されている。



(a) 縮退四光波混合



(b) ブリルアン増強四光波混合

図8 位相共役光の光路補正実験結果

図9にブリルアン増強四光波混合において、速度43m/sで運動しているターゲットを用いた場合のCM1, CM2, CM4の測定エネルギーを示す。それぞれの値は~17 mJ, ~3.0 μJ, 110 nJである。バックランドノイズを差し引くと~80 nJで運動中のターゲットへ位相共役光が照射されたことが示されている。

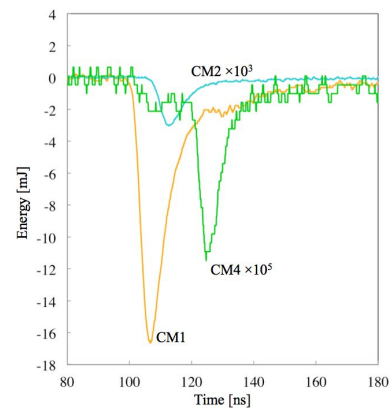


図9 運動しているフォームターゲットへの位相共役光照射実験結果

大阪大学のレーザー装置激光 XII 号の光学パラメータを使用した散乱角の検討

ターゲットから最も遠い位置にある光学素子やアパーチャーの最も狭いピンホールによって散乱角は制限される．ここでは SF100 のピンホール (SF100 = 1.2 mm), 最後の RA50 の二つの場合の散乱角について $d = 3.0$ mm , ターゲットの x 軸方向のずれを dx , z 軸方向のずれを dz とし, dx, dz と d との関係を検討した．図 10 に SF100 のピンホールに関する計算結果を示す. dz にほとんど依存せず, dx に依存することが分かる．また, 有効な散乱角は大きく制限され, ピンホールを抜ける角度は $d = \pm 22$ mrad となり, dx の範囲はおおよそ ± 0.4 mm であることが分かる．

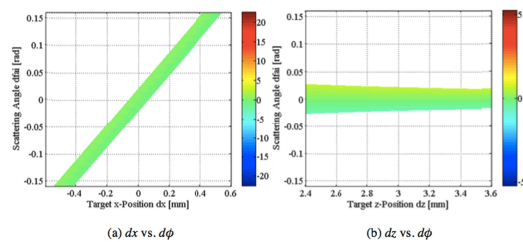


図 10 SF100 のピンホールに関する計算結果

また, 図 11 に RA50 に関する計算結果を示す．同様に dx に依存することが分かり, $d = \pm 96$ mrad であり dx の範囲はおおよそ ± 0.4 mm であることが分かる．

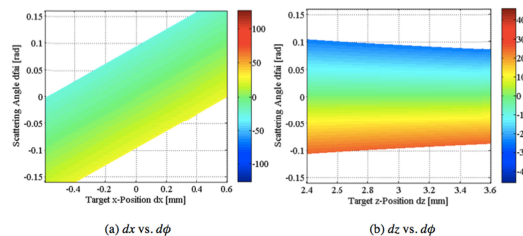


図 11 RA50 に関する計算結果

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)

N. Kameyama, H. Yoshida, “ Method of Beam Steering with FWM in ICF -Compensation and Generation of PC Beam with a Foam Target- ”, Plasma Fusion Research, 査読有, Vol.9, 2014, pp. 4404102-1~4

N. Kameyama, H. Yoshida, “ Compensation for Target Motion between Seed Pulse and Phase Conjugate Beam Arrival Times at the Target ”, Fusion Science and Technology, 査読有, Vol.63, 2013, pp.120-124

N. Kameyama, H. Yoshida, “ Target Separation from Sabot with Permanent

Magnetic Array and Beam Steering Method with Four-Wave Mixing ”, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.8, 2013, pp.3404045-1~4

[学会発表] (計 28 件)

H. Yoshida, N. Kameyama, “ Target for non-mechanical beam steering -Target surface and beam compensation by Four-Wave-Mixing - ”, International Symposium on Integrated Molecular/ Materials Science and Engineering 2014, 2014/11/01-03, Nanjing (China)

H. Yoshida, K. Kojima, N. Kameyama, “ Fast Ignition Target and Laser-Beam Steering ”, 5th Target Fabrication Workshop, 2014/06/06-11, St Andrews (Scotland)

H. Yoshida, N. Kameyama, “ Target Injection and Sabot Removal for IFE ”, The 5th Japan-China Bilateral Workshop on IFE Target Material and Technology, 2014/01/24, Gifu University (Gifu, Japan)

H. Yoshida, N. Kameyama, T. Norimatsu, “ Magnetic Sabot Remover for Polystyrene-Target Injection ”, Inertial Fusion Science and Application 2013, 2013/9/08-13 Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan)

H. Yoshida, N. Kameyama, “ Accuracy Required for the Target Injection in the Method of the Beam Steering with FWM ”, Inertial Fusion Science and Application 2013, 2013/9/08-13 Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan)

H. Yoshida, N. Kameyama, T. Norimatsu, “ Target and Sabot Separation and Tracking in Injector ”, Inertial Fusion Science and Application 2013, 2013/9/08-13 Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan)

T Norimatsu, T Endo, H. Yoshida, R. Tsuji, Y Kajimura, M Nagata, M Matsumoto, H Azechi “ Release of Real Size, Fast Ignition Target from Sabot ”, Inertial Fusion Science and Application 2013, 2013/9/08-13 Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan)

R. Tsuji, H. Yoshida, T Norimatsu, “ Development of Position Measurement Unit for Flying IFE Target ”, Inertial Fusion Science and Application 2013, 2013/9/08-13 Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan)

H. Yoshida, N. Kameyama, “ Target Injector and Sabot Remover for IFE ”, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2012/10/29-11/02, Providence (Rhode Island, USA)

N. Kameyama, H. Yoshida, “ The compensation of the PC beam of the scattered beam by a foam target with FWM for beam steering ”, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2012/10/29-11/02, Providence (Rhode Island, USA)

H. Yoshida, N. Kameyama, “ Target Injector and Sabot Remover for IFE ”, The 4th Japan-China Bilateral Workshop on IFE Target Material and Technology, 2012/09/22, Heartful Square (Gifu, Japan)

N. Kameyama, H. Yoshida, “ The compensation of the PC beam of the scattered beam by a foam target with FWM for beam steering ”, The 4th Japan-China Bilateral Workshop on IFE Target Material and Technology, 2012/09/22, Heartful Square (Gifu, Japan)

N. Kameyama, H. Yoshida, “ Injection and Beam Steering Study for Polystyrene Foam Target -Probing System with Phase Conjugate Mirror- ”, 20th Target Fabrication Meeting, 2012/05/20-24, Santa Fe (New Mexico, USA)

N. Kameyama, H. Yoshida, “ Injector and Beam steering: The Beam Steering for IFE with Degenerate Four-Wave Mixing with Scattered and Reflected Light by a Foam Target ”, Conference on Inertial Fusion Energy ' 12, 2012/04/25-27, Pacifico Yokohama (Yokohama, Kanagawa, Japan)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

無し

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~plasma/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉田 弘樹 (Hiroki Yoshida)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：90230755

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し