

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」

平成 18 年度採択研究代表者

渡部 俊太郎

(東京大学物性研究所 副所長/教授)

「高強度光電界による電子操作技術の開拓」

1. 研究実施の概要

位相制御された 5 フェムト秒テラワット級のOPCPA(光パラメトリックチャープパルス増幅)システムを開発し、サブ 100 アト秒パルスを発生し、光波合成によって生成した任意電場波形と組み合わせ、アト秒オシロスコープを開発することを目的としている。これによりアト秒時間分解分光の確立と電子操作を目指している。

物性研ではまず既存の装置と組み合わせ、OPCPAシステムの開発を行った。途中経過であるが既に 6.4 フェムト秒のパルス幅と平均出力 1.2 W(1 kHz)の出力を得た。このパルス幅は既にOPCPAでは最短であり、平均出力も1 kHzの繰り返しOPCPAでは最高である。課題は明確になっており、19年度前半にパルス幅 5 フェムト秒、平均出力 2~3 Wを得る見込みである。またパルス内光波位相制御を産総研の協力のもとに行う予定である。

産総研では、多波長位相同期パルスのフーリエ合成による電界波形の完全に制御された高強度任意波形レーザーの開発を第一目標として取り組んでいる。現在まで多波長パルスの同時増幅のための励起光源として、高出力 Yb ファイバ増幅器を用いて、繰り返し 1.75 MHz でパルスエネルギー $6 \mu\text{J}$ の光源を得ることができた。今後は、さらなる高出力化及び、パラメトリック増幅による多波長パルスの同時増幅を行い、高強度任意波形レーザーの実現をめざす。

2. 研究実施内容

サブ 100 アト秒パルスを発生し、光波合成によって生成した任意電場波形と組み合わせ、アト秒オシロスコープを開発することを目的としている。これによりアト秒時間分解分光の確立と電子操作を目指している。

物性研ではサブ 100 アト秒高調波パルスを発生するため、5 フェムト秒テラワット級OPCPA(光パラメトリックチャープパルス増幅)システムの開発を開始した。

システムの概略を図1に示す。このシステムの特徴はOPAのポンプ源としてチタンサファイアレーザーの2倍波(400 nm)を使ったことと、ポンプ光(100 ps)とシード光(45 ps)を自動的に同期したことである。発振器は 800 nm を中心に1オクターブの波長域を持つ。ポンプ用のチタンサファイアの

パルス幅を 100 ps とするため再生増幅器の中に3枚組みの複屈折フィルターとエタロンを挿入し、狭帯域化した。ここに広帯域のシード光を注入することにより、これと同期した 100 ps ポンプ光を得た。この方式はオリジナルである。このパルスを4パス増幅し、その出力を2分割して2台の1パス増幅器で増幅した。得られた平均出力は各々8.5 W と9.5 W であった。この2倍波で各々5.5 W と6 W のポンプ光を得た。5.5 W は2分割し1, 2段のOPA増幅器(BBO)のポンプに使い、6 W で3段目をポンプにした。発振器からの広帯域光はグレーティング対により45 ps にストレッチした。負チャープを与えたことになるがこれは最終段増幅後に長さ 25 cm のSF57ガラスの正分散でパルス圧縮するためである。このままでは3次の分散が大きいいためプリズム対により補償した。これらの受動的な分散補償により全波長域での群遅延を 2 ps 以内に抑え、残留分散は音響光学素子ダズラーによって補償した。通常のグレーティング対による圧縮のスループットが 50 %程度に対し、この方式ではほぼ 100 %である。これにより 6.4 fs のパルスが得られた。このパルス幅はOPCPAとしては既に最短である。

次に高出力化を行った。一般にOPAの利得は高く、シードに無関係に発生するOPG背景光が問題となる。OPGを抑えつつ増幅する必要がある。各段の利得は 10^4 (1段目)、 10^2 (2段目)、 10^3 (3段目)程度であり、今のところ出力は 1.2 W であった。現在ポンプ用チタンサファイアレーザーの一列にもう1段増幅器を追加し、ポンプ光出力を 6 W から 12 W にあげることにより、2~3 W のOPA出力を予定している。今後更に広帯域化を行い、5 fs のパルスを得る予定である。オクターブ発振器の波長域の両端から 1,140 nm とその倍波 570 nm が取り出されており、この2波長の干渉により発振器の位相制御を行う。最終的にはシステム全体の位相制御も出力の一部を取り出して行う。

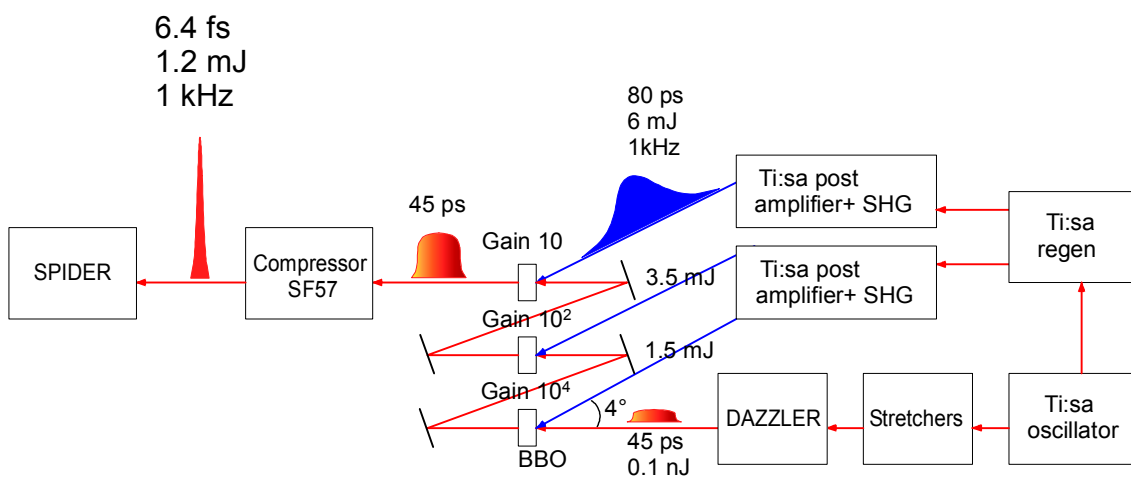


図 1 OP CPA 実験の実験系図

産総研では、多波長位相同期パルスのフーリエ合成による電界波形の完全に制御された高強度任意波形レーザーの開発を第一目標として取り組んでいる。本年度は、パラメトリック増幅による多波長パルスの同時増幅用の励起光源として、高出力 Yb ファイバレーザー増幅器の開発を行った。シードとなる多波長パルスは、光パラメトリック発振器によって得られており、高精度な位相同期が既に実現している。波長としては、425nm, 510nm, 638nm, 850nm, 1275nm, 2550nm の6色が存

在し、これらを同時に増幅するために、高出力高繰り返しピコ秒 Yb ダブルクラッドファイバレーザ増幅器の基本波 1064nm, 第2高調波 532nm, 第3高調波 355nm を励起光源として用いることを計画している。

シード光と励起光のタイミングをフェムト秒レベルで同期するために、シード光の一部をフォトニック結晶ファイバで波長変換し、その波長 $1\mu\text{m}$ 成分を Yb ファイバレーザのシードとして用いた。発振器の 100MHz 繰り返し周波数では、1段のダブルクラッドファイバ増幅器で平均出力 7W まで増幅を行い、回折格子対でパルス再圧縮を行った結果、ほぼフーリエ限界の 100 フェムト秒まで圧縮できることを確認した。

次に、高強度化を念頭にマイクロジュールレベルまで増幅するために、半導体光増幅器に分周信号のゲートをかけて、繰り返し周波数を 1.75MHz まで分周してから増幅を行った。増幅は、2段のシングルクラッドファイバ増幅器とコア径の異なる高出力ダブルクラッドファイバ増幅器2段の計4段の増幅器を用いて行った(図2)。その結果、平均出力 11W, パルスエネルギーとして $6\mu\text{J}$ を達成した(図3)。

これらの成果により、平成18年度計画は達成できた。今後、さらなる高出力化及び多波長位同期パルスのパラメトリック増幅に着手する予定である。

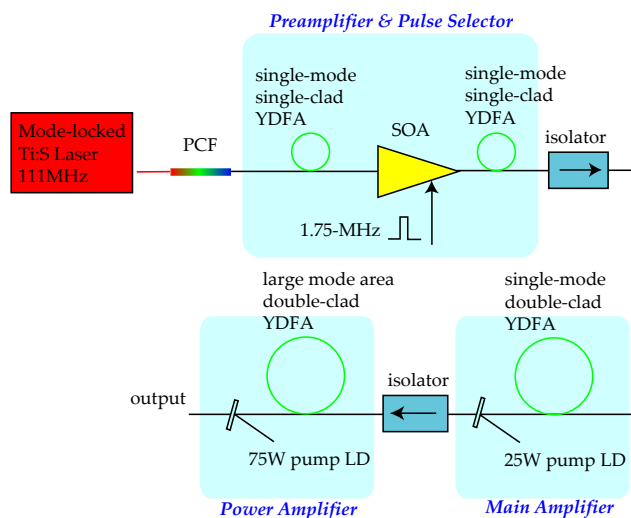


図2 Yb ファイバ増幅システム

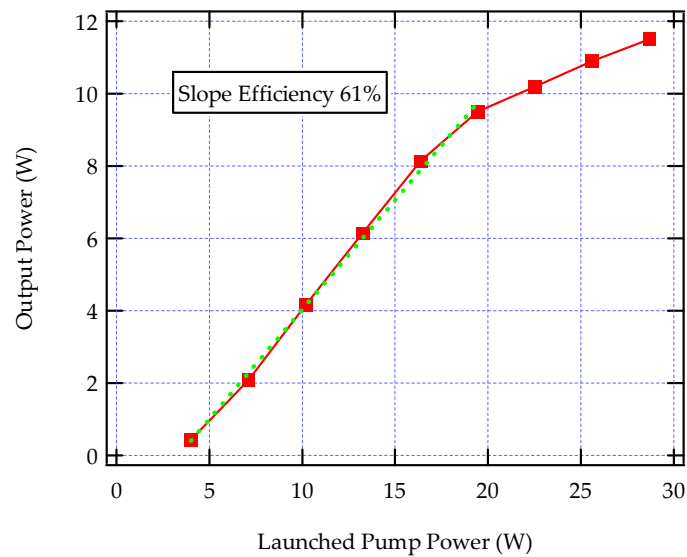


図 3 増幅出力特性

3. 研究実施体制

(1) 渡部 俊太郎「物性研」グループ

研究項目

- ・ 5 フェムト秒サブテラワットOPCPAシステムの開発
- ・ サブ 100 アト秒パルスの発生とアト秒時間分解分光

(2) 鳥塚 健二「産総研」グループ

研究項目

- ・ OPO によるサブフェムト秒任意光電場波形生成とその計測
- ・ OPA 用光学素子開発及び位相制御

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

(1) 「物性研」グループ

- A. Kosuge, T. Sekikawa, X. Zhou, T. Kanai, S. Adachi, and S. Watanabe, “Frequency-Resolved Optical Gating of Isolated Attosecond Pulses in the Extreme Ultraviolet” Phys. Rev. Lett. , Vol. 97, 263901-1-4 (2006)
- T.Liu, T.Kanai, T. Sekikawa, and S. Watanabe “Significant enhancement of high-order harmonics below 10 nm in a two-color laser field” Phys. Rev. A, 74, 063823-1-8 (2006)
- T. Baba, T. Yokoya, S. Tsuda, T. Kiss, T. Shimojima, S. Shin T. Togashi, C.-T. Chen, C.Q. Zhang, S. Watanabe, T. Watanabe, M. Nohara, H. Takagi “Laser-excited ultrahigh-resolution photoemission spectroscopy of borocarbide superconductor RNi₂B₂C(R=Y and Er) PHYSICA C-SUPERCONDUCTIVITY AND ITS

APPLICATIONS, 445, 46-49 (2006)

- K. Ishizaka, R. Eguchi, S. Tsuda, T. Yokoya, A. Chinani, T. Kiss, T. Shimojima, T. Togashi, S. Watanabe, C.-T. Chen, C.Q. Zhang, Y. Takano, M. Nagao, I. Sakaguchi, T. Takenouchi, H. Kwarada, and S. Shin “Observation of a Superconducting Gap in Boron-Doped Diamond by Laser-Excited Photoemission Spectroscopy” Phys. Rev. Lett., Vol. 98, 047003-1-4 (2007)