

論文の内容の要旨

論文題目 適応型位相制御による超短パルス高出力チタンサファイアレーザーの研究

氏名 周 翔宇

高次高調波の最近の一つの話題はアト秒パルスの発生である。本研究室は2004年にパルス幅サブ10fsの青色レーザーを使って、950as高次高調波パルス自己相関波形を計測した。基本波8fsの9次高調波のフーリエ限界パルス幅は1fs程度であるので、アト秒パルスの発生のためには10fs以下のパルス光源が必要である。従って、本研究の目的は高尖頭出力を持つ超短パルス高繰り返しレーザー光源を開発することである。

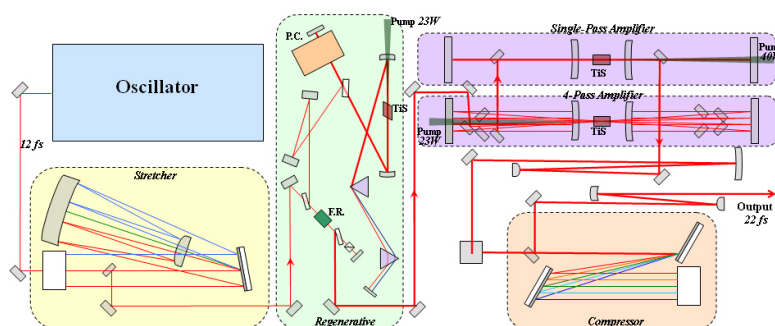


図1、5kHz レーザー装置

本研究に用いた5 kHz チタンサファイアチャープパルス増幅器(CPA)は1999年鍋川等によって開発されたものである(図1)。超短パルスモード同期発振器の出現により、CPAと組み合わせて、テーブ

ルトップサイズの装置からTW級の出力が得られるようになった。発振器は、75MHz 12fsのパルスを発生する。パルスは stretcher で時間的に伸ばされて、再生増幅器に入る。再生増幅器の中でパルス光を15回往復させて取り出し、マルチパス増幅器に送る。4-パス増幅器と最後の1-パス増幅器により、増幅されたパルスを grating 対を用いてパルス幅を圧縮する。最終的に22fsのパルスが得られた。トータルシステムとして位相のバランスを取るため、再生増幅器にプリズム対を挿入した。

1、可変形鏡(DM)と遺伝アルゴリズム(GA)を用いた CPA 超短パルス増幅

12fsの seed パルスが増幅後22fsになる原因は増幅が進むにつれてスペクトルの狭帯域化が起こるためである。再生増幅器の場合は低いフルーエンスで多数回往復させるため狭帯域化の効果が大きい。狭帯域化を防ぐため、再生増幅器の共振器中に、2枚の薄膜偏光子からなるエタロンを差し込む。入射角と間隔を調整して、波長毎の損失を制御する。また、もう一枚厚さ2 μm のペリクルを挿入して、スペクトル幅を制御する。更にスペクトル整形のために空間マスクとして針三本を使用した。再生増幅器から得られた波長スペクトルは740nmから865nmに及び、半値全幅115nmが得られた。フーリエ限界パルスで、14fsに対応する(図2)。

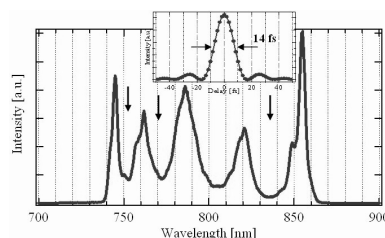


図2、スペクトル

パルス幅が広がるもう一つの原因はパルスの中に残った高次分散である。グレーティング対とプリズム対を用いて、2次と3次の位相分散を概ね補償することができるが、フ

一リエ限界パルスを得るため、全システムの高次分散の補償が必要である。本実験は可変形鏡を用いて、位相補償を行った。レーザー光をグレーティングで分散させ、それぞれの波長成分を DM により反射させる。鏡面で反射光のスペクトル領域の位相面を制御する。DM のコントロール電圧と鏡面の変位量は 1 対 1 ではないので、手動調整は不可能になる。そこで我々は、遺伝的アルゴリズムを用い、DM を自動調整してレーザー光の位相面補正を行った。

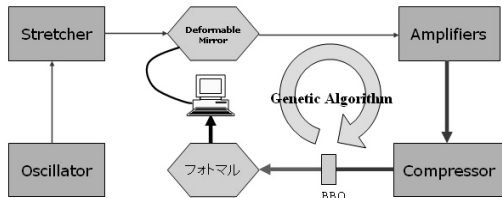


図3、可変形鏡と遺伝アルゴリズムを用いた CPA 超短パルス増幅

増幅されたレーザー光は非常に高いエネルギーを持っているため、DM 装置は図3のように、増幅前の Stretcher と再生増幅器の間に置いた。増幅したパルスから BBO 結晶で 2 倍波を発生させる。この 2 倍波の強度信号を光電子増倍管で測って、Oscilloscope でデジタル信号に変換し、コンピューターに伝送する。パルス幅が短いと、ピーク強度が大きくなって、2 倍波信号は強くなる。この強度信号は GA プログラムの選択標準として使われた。GA の結果によりリアルタイムで自動的に DM 面を調整して、新しい強度信号をもう一度測る。この操作を何回も繰り返して、SHG 信号が最大になるよう調整する。

図4は、DM を使わない場合(a)と DM を使った場合(b)の SHG-FROG(Frequency Resolved Optical Gating)トレスである。補償前と補償後を比べると、補償後、パルス幅は細くなり、両側のサイドピークは弱くなった。SHG-FROG から再生したパルス波形と位相を各々図4に示す。補償前の位相に対して、補償後の位相はフラットになった。また、パルス幅は 19fs から 15fs になった。

アト秒パルス発生のためには、パルス幅 10fs 以下が必要である。基本波では 10fs 以下発生は難しいので、2 倍波発生によって、サブ 10fs のパルスを生成する。基本波から 2 倍波に変換すると同時に、ASE も取り除く。原理的に、基本波の全部の波長成分が変換されると、発生される 2 倍波の時間領域のパルス幅は基本波より狭くなる。実際には、フェムト秒のパルスの SHG に於いては基本波と 2 倍波の群速度ミスマッチにより、許容スペクトル幅が狭くなる。パルスのスペクトルが許容スペクトル幅以上に広い場合、狭帯域化の問題が起こる。これを解決するため、Broadband Frequency Doubling (BFD) 光学系を用いて、全帯域 SHG を行った。

図5に示すように、まず Grating 1 の角度分散を利用して、波長毎に位相整合角で結晶に入射するように配置する。角度分散を補償するために、Grating 2 の溝数と 2 倍にし、BBO の前後で対称な光学系を用いた。収差の影響を防ぐために、BBO の前後とも望遠鏡配置とした。

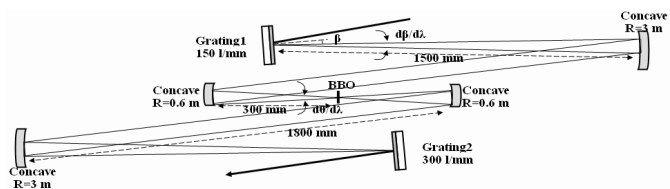


図5、Broadband Frequency Doubling

SD(Self Diffraction)-FROG の方法を用いて、2 倍波のパルス幅を測った。15fs の基本波から、BFD を用いて、7.5fs の 2 倍波が得られた。FROG trace を再構築した trace は、元の

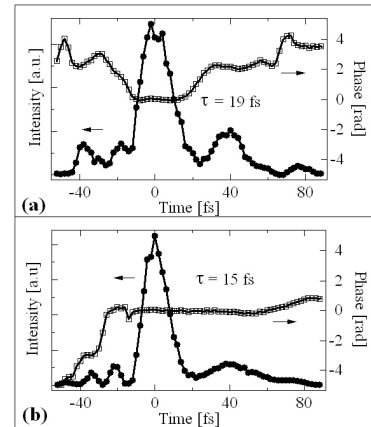


図4、パルスの波形と位相 (a)補償前、(b)補償後

trace の形とほぼ一緒になり測定は信頼できる。

基本波出力パワーは 7W であり、2 倍波出力パワーは 1W である。

2、音響光学素子(DAZZLER)を用いた高次分散補償による CPA 超短パルス増幅

前回の実験には問題点がある。針を挿入すると、パルスの安定性は悪くなり、増幅したパルスの出力パワーは弱い。DM システムの調整が難しいため、GA の効率が低く、安定性が良くない等である。今回、この問題の改善のため DAZZLER 位相制御による超短パルスチタンサファイアレーザーシステムの開発を行った。

まず、再生増幅器にプリズム対でビームを分散させた位置に多層膜フィルタとペリクルを差し込んで、スペクトル幅を制御した。多層膜フィルタは透明膜の多層構造である。各層の屈折率を連続的に変化させ、800nm 付近の波長域で透過率が低く、その外部で透過率 100%を取る。増幅光は共振器中を往復させて、透過スペクトルを制御する。空間マスクは入れなくても、波長スペクトルは 740nm から、865nm まで得られた。フーリエ限界パルスで、15fs になり、前回とほぼ同じスペクトル幅が得られた (図 6)。更に、空間マスクを使わないので、ビーム品質と安定性は前回よりよくなった。

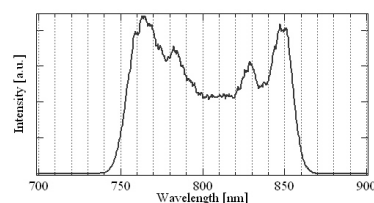


図 6、スペクトル

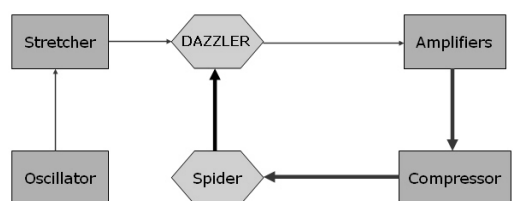


図 7、音響光学素子を用いた高次分散補償による CPA 超短パルス増幅

今回、DAZZLER 位相制御による超短パルスチタンサファイアレーザーシステムは図 7 のように配置した。DAZZLER は強度および位相が同時に整形できる。増幅器の 3 次、4 次の分散補償して、位相をフラットにすることが可能である。今回使った DAZZLER はファーストライト社の WB-800 であり、波長

チューニングレンジは 700nm から 900nm まで、最大プログラムディレイは 3ps である。DAZZLER は Stretcher と再生増幅器の間に置いている。増幅したパルスを SPIDER で測って、位相の情報を得る。その位相のデータは DAZZLER に伝送されて、自動的に位相が補償される。

図 8 は、今回 SPIDER で測って DAZZLER を使わない場合(a)と DAZZLER を使った場合(b)のパルス波形である。補償後、パルス幅は細くなり、両端のサイトーピークは弱くなった。パルス幅は 18fs から 16fs になった。増幅後の平均出力は 16W で、Compressor 後、出力パワーは約 9W である。

次に、Broadband Frequency Doubling 光学系を用いて、全帯域 SHG を行った。16fs の基本波から、BFD を用いて、平均出力パワー 1.3W、8fs の 2 倍波が得られた。

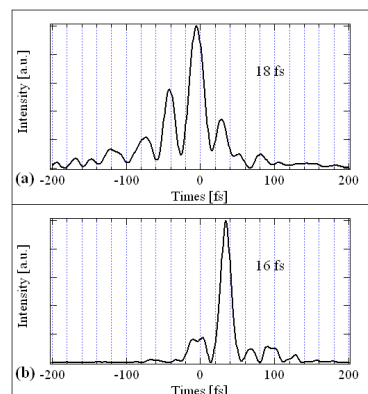


図 8、パルスの波形と位相 (a)補償前、(b)補償後

3、光パラメトリックチャープパルス増幅(OPCPA)を併用したハイブリッド超短パルス増幅

チタンサファイア CPA システムは現在広く応用されているが、欠点がある。増幅しながら、スペクトルの狭帯域化がどうしても起こってしまうので、10fs 以下の高出力パルスが発生することは難しい。そこで近年、新たな増幅方法として、光パラメトリック増幅

(OPA) という増幅方法が注目されている。OPA は、従来のような反転分布を利用した増幅方法とは異なり、パラメトリック過程によるパンプ光からシグナル光への直接的なエネルギー転送によって増幅される。OPA の最大の特徴は非同軸配置パラメトリック増幅 (NOPA) 位相整合条件によりスペクトル領域を広くとれることである。しかし、OPA の欠点は変換効率が低いので大きなエネルギーが得にくい。そのため我々は前段で OPA 増幅して、後段でチタンサファイア結晶を用いた増幅を行った。それにより、広帯域と高出力パルスを両方得ることが可能と考えられる。

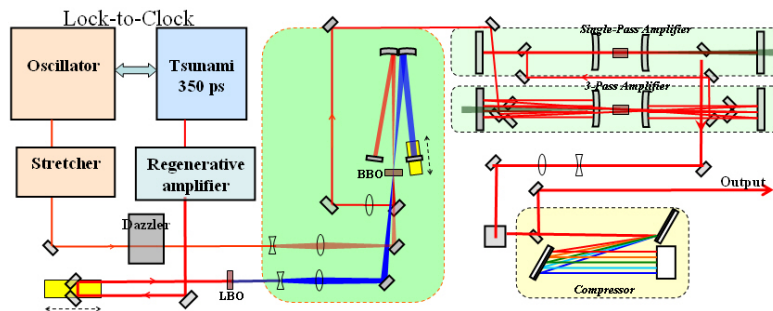


図9、OPCPA システム

OPCPA ハイブリッドシステムを図9に示す。チタンサファイア CPA でスペクトルが一番狭まるのは再生増幅器である。従って、再生増幅器を OPA 増幅に置き換えた。OPA 器は再生増幅と比べると、増幅

利得スペクトル幅が広く、また多層膜フィルタなどの光学素子が要らず、結晶の位相整合角を調整することにより、増幅スペクトルを制御できる。

発振器から発生した 80MHz 超短パルス光にチャープを与え、時間的に伸ばす。このチャープが与えられた光を OPA 増幅法によって 2 段増幅した後、マルチパス増幅し、最後に圧縮するという方法である。OPA のパンプ光源を作るため、もう一台 Tsunami Ti:sapphire 狭帯域光源を用いて、外部同期装置(Lock to clock)により、Oscillator の繰り返し周波数で同期発振させた。再生増幅器装置を用いて、4.3W まで増幅し、20mm の LBO 結晶で 2.1W の 2 倍波パルスを発生させ、OPA のパンプ光として使った。出力パワーは約 2.1W である。被増幅光には BBO と Sapphire 結晶の分散が含まれているが、プリズム対で補償しなくても、Dazzler だけで高次分散までの補償がカバーできる。

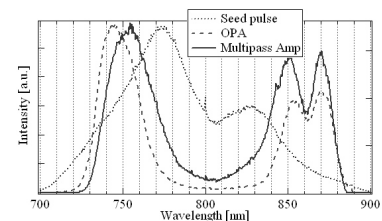


図10、スペクトル

NOPA において波長領域 720nm から 890nm まで 50mW のパルスが得られた。マルチパス増幅した後、725nm から 885nm まで 3.5W のパルスが得られた。(図 10)

SPIDER で測った増幅されたパルスの位相データは DAZZLER に伝送されて、自動的に位相を再補償され、11fs の超短パルスが得られた。(図 11)

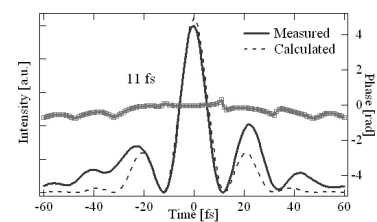


図11、パルスの波形と位相

以上まとめると、超短パルス化を進め、DM と GA を用いて CPA パルス増幅による 15fs の基本波と 7.5fs の 2 倍波が得られた。より安定化を目指し、DAZZLER を用いて CPA パルス増幅による 16fs の基本波と 8fs の 2 倍波が得られた。更なる短パルス化のため、OPA とチタンサファイア増幅を併用したハイブリッド超短パルス増幅により 11fs の基本波が得られた。