

# 超短パルス高出力レーザーの研究 (要約)

鍋川康夫

## 1 序

コヒーレント光源としてのレーザーは近年多様な発展を見せている。特に高強度レーザーによる高次高調波発生は、高調波自身が光源としての応用される段階に入っており、光学テーブル上で真空紫外、極端紫外を発生させる光源として期待されている。光源として用いる場合、発生する高調波の量をできるだけ多くするために、いかに高率良く発生させるかという研究と共に、基本波となるレーザー光の改良が重要になってくる。固体分光のような物性研究に用いるならば、1パルスあたりの強度の増大もさることながら、レーザーの繰返しを高め、微弱信号の計測を容易にすることも重要な要素であり、それ故、高強度レーザーの高繰返し化が近年の大きな技術課題になっている。

本論文ではこれらの応用を目的とした高繰返し、高ピーク出力、高平均パワーのレーザー研究開発について報告する。

## 2 チャープパルス増幅

超短パルス固体レーザーに於ける増幅で問題になるのは自己収束による媒質の破壊である。これを解決したのがチャープパルス増幅法 (Chirped Pulse Amplification, CPA) である。媒質中で問題になるのはピーク強度である事から、増幅中はパルス幅を伸ばしておき、最後にパルスを圧縮して、高エネルギーの超短パルスを得るとというのが基本のアイデアである。

## 3 分散補償

再生増幅器では、チタンサファイア、ポッケルスセル、薄膜フィルム偏光子などの分散媒質を光パルスが数多く通過し、20fs 領域に於ては無視できない影響をパルス光に与えるため、これをいかにして取り除くかが大きな課題となる。本研究では再生増幅器の共振器内に適度な分散補償を行える媒質で作られたプリズム対を挿入すしてこの問題を解決した。

光線追跡による数値計算によって幾つかのプリズム媒質を検討した所、小原光学製の LAH64 (Shott 社の LaSF014 と同等) を用いると、ほぼフーリエ限界に近いパルスが得られる事がわかった。

この方法は材料分散の変化や、Stretcher や Compressor の回折格子に対する入射角の変化に対して、僅かな配置の変更であらたな分散補償を行える利点を持ち、増幅システムの拡張に対応しやすい。本研究で開発された高繰返しの超短パルス増幅器はこの手法で分散補償を行っている。

## 4 熱レンズ

高エネルギーかつ高繰返しの増幅器で大きな問題となるのは、Ti:sapphire 内で発生する熱の効果である。特に励起領域に生ずる温度分布に起因する熱レンズ効果はビームの伝播に直接影響を与えるので、これを考慮した増幅器設計が不可欠である。これを補償して高効率の増幅に成功したのが本研究の成果

のひとつである。

本研究では熱レンズを補償するために2枚の凹面鏡を用いたマルチパス増幅器を考案した

ここでのポイントは凹面鏡間距離を曲率半径より長くして熱レンズとバランスをとり適度な(十分に大きい)ビーム径をTi:sapphire上で得る事にある。なおこの場合、焦点位置にTi:sapphireが無い場合、各パスの折り返しは独立した45°ミラーで行う必要がある。

ビームはほぼ同じ距離を往復するため、各パスの伝播が同じになるためには折り返しミラーの位置に0°ミラーを置くことによってできる共振器が安定であることが必要条件である。この擬共振器に対して熱レンズを含んだ形でのビーム伝播をABCD行列によって計算し、この方法が熱レンズ補償に有効である事を確かめた。

## 5 1kHz、0.66-TW チタンサファイアレーザーシステム

本研究では繰返し1kHzのsub-TW Ti:sapphireレーザーシステムを開発した。モード同期発振器、Öffner型Stretcher、再生増幅器を経た光パルスは熱レンズ補償を行った3-パス、2-パスで増幅される。得られたエネルギーは26.5Wである。各マルチパス増幅器のTi:sapphireに吸収された励起光に対するエネルギーの取り出し効率はそれぞれ38%、33%であり、1kHzの増幅器としては最高の効率である。

増幅光は平行配置の回折格子によるCompressorによってパルス圧縮される。圧縮後のパルス波形を2倍波発生による周波数分解光ゲート法(SHG-FROG)によって計測、再構築した結果を図に示す。こ

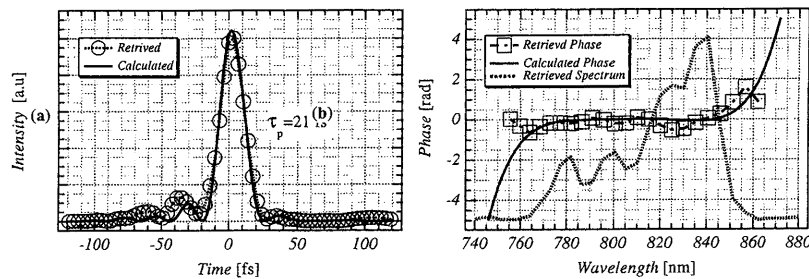


図 1: SHG-FROG による出力パルスの再構築結果。(a): 再構築されたパルス波形。実線は光線追跡による数値計算結果。半値全幅は 21fs。(b): 再構築されたスペクトル領域での位相。実線は光線追跡による数値計算結果。

れによって得られたパルス幅は 21fs である。実測したスペクトルに、光線追跡によって数値計算された位相を考慮して計算されるパルス波形は、この実測値と良く一致しており、§3 で述べた分散制御の有効性が確かめられた。

Compressor 後のパルスエネルギーは 14mJ であり、結果として 0.66TW のピーク出力が得られた。

## 6 全固体 5-kHz 0.2-TW チタンサファイアレーザーシステム

5-kHz のシステムの励起源は LD 励起の Q-スイッチ Nd:YAG レーザーの 2 倍波である。LD 励起の固体レーザーはランプ励起のものに比べて寿命が長く、熱的な安定性にすぐれ、さらにメンテナンスが容易であるという長所がある。これを Ti:sapphire の励起に用いる事によって、本システムは全レーザー媒質の固体化が達成されている。

基本的な構成は 1kHz のシステムと同じであるが、繰返し及び励起パルスエネルギーの違いにより、再生増幅器とマルチパス増幅器の(擬)共振器構成が異なっている。特にマルチパス増幅器は 4 パスのステージが 1 段、それに続く最終段が 1-パスの構成となっている。

マルチパス増幅器の各パスでの出力パワー、及びパルス圧縮後の FROG 計測によるパルス波形を図 2(a)、(b) に示す。37W という平均出力は今までで開発されてきた超短パルス増幅器としては最大である。

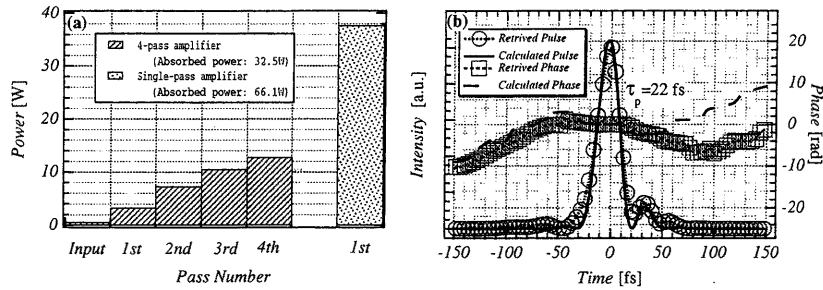


図 2: (a): 各パスの出力パワー。(b):SHG-FROG による出力パルスの再構築結果。実線は光線追跡による数値計算結果。

SHG-FROG によるパルス波形計測の結果得られたパルス幅は 22fs であり、パルス圧縮後のパワーが 22W (5kHz) であることから、ピークパワーは 0.2TW となった。

## 7 KrF-チタンサファイアハイブリッドシステム

超短パルスの高出力レーザーを紫外域で得ようとした場合、稀ガスハライドのエキシマが有力なレーザー媒質である。Ti:sapphire の利得波長域は KrF の波長 248.3nm の 3 倍にあたる 745nm をカバーしているため、745nm での Ti:sapphire CPA システムの出力を波長変換し、十分なエネルギーの紫外超短パルスの種光を用意できる。これによって KrF での増幅段は 1 つで済むので、ASE の問題を回避した紫外光の超短パルス増幅システムを構築できることになる。本研究ではこの考えに基づき 10Hz の TW システム、kHz の増幅システムを開発し、さらに紫外領域での sub-100fs パルス発生の実験を行った。

なおこれらのシステムでは KrF 種光の 3 倍波発生における Pre-delay の為に 1 枚の基盤に 4 種類のコーティングを行ったビームスプリッターを用いたマイケルソン干渉計型の delay line を製作している。この delay line を用いる事によって、745nm の基本波から 248.3nm の 3 倍波へのエネルギー変換効率は最大で 10% になった。

10Hz の繰返しで 1TW のピーク出力を持つ KrF レーザーを Ti:sapphire の CPA システムをベースに開発した。得られたエネルギーは 200mJ、3 光子蛍光法によるパルス幅の計測結果は  $\text{sech}^2$  型のパルス波形を仮定して 440fs であった。パルス幅の広がりやウィンドウその他によるチャープが原因であるので、これを  $\text{CaF}_2$  プリズムによって補償した所、パルス幅は 130fs まで縮まり、パルスエネルギーは 130mJ となった。これによって 1TW のピーク出力が得られた事になる。

この開発の後、1kHz、745nm、の Ti:sapphire CPA システム ( $\sim 1\text{mJ}/\text{pulse}$ ) と組み合わせた 1kHz の超短パルス KrF エキシマレーザーの実験を行った。

システムの基本構成は 5 に用いられているものと同様の共振器構成による 1kHz の Ti:sapphire 再生増幅器によって 745nm の CPA を行い 160fs、570 $\mu\text{J}$  のパルスを得、波長変換、KrF 増幅を順次行うものである。

超短パルス増幅の平均出力は図 3(a) に示す通り繰返し 500Hz までは線形に増加したが、それ以上の繰返しでは飽和した。これはおそらくガスの循環が不足気味であった事が原因と思われる。しかしながら、1kHz で 7W の平均出力が得られ、超短パルスの紫外光としてはこれまでで最大の平均出力を実現した。パルス幅は図 3(b) に示す通り  $\text{sech}^2$  でフィッティングして 300 fs であった。

kHz のシステムにおいて、KrF の利得帯域をできるだけ広く用い、これに分散補償を行うことによって 100fs を切るパルス幅の高エネルギー紫外光を得る実験を行った。

Ti:sapphire CPA のスペクトルを制御し、さらに波長変換後の 3 倍波を  $\ddot{\text{O}}$ ffner 型の Stretcher に通した後、KrF 増幅後に回折格子対の Compressor を用いることによって分散補償を行った。

スペクトル制御を行った後 KrF で増幅して得られたスペクトルを図 4(a) に示す。大きく利得の中央にディップを持った種光 (Ti:sapphire の 3 倍波) を入力する事によって 1.6nm の幅が得られた。スペク

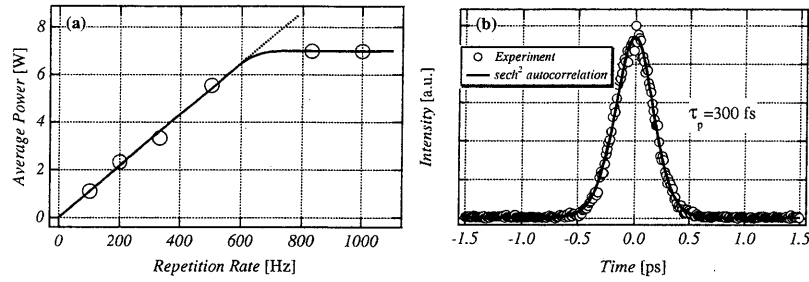


図 3: 高繰返し超短パルス KrF/Ti:sapphire レーザー実験結果。(a): 繰返しに対する平均出力の変化。(b): 3 光子蛍光法による自己相関波形。

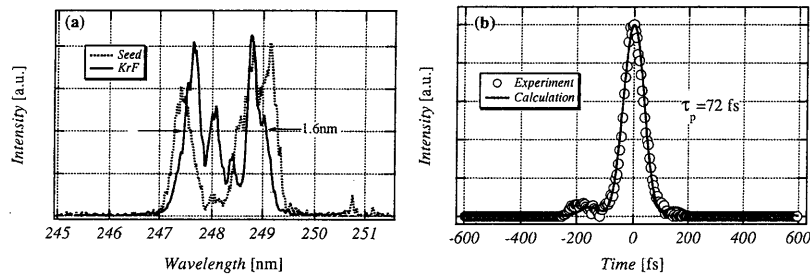


図 4: sub-100 fs, KrF/Ti:sapphire レーザー実験結果。(a): KrF レーザーのスペクトル制御の実験結果。点線: 種光のスペクトル。実線: KrF 増幅後のスペクトル。両脇のピークの半値の所どうしでの幅は 1.6nm。(b): 分散補償後の 3 光子蛍光法による自己相関波形 (白丸)。実線はスペクトルから計算されるフーリエ限界パルスから計算される自己相関波形。両者が一致している事からパルス幅は 72fs である。

トル制御をしない時のスペクトル幅は 0.9nm であり、約 1.8 倍の幅に広帯域化した事になる。

Compressor 後の出力は 600mW、パルス幅は図 4(b) に示す通り、スペクトルから計算されるフーリエ限界パルスの自己相関波形とほぼ一致しており、パルス幅は 72fs であった。これによって、sub-100fs の超短パルス紫外光が 1kHz、600 $\mu$ J という高エネルギーで得られた事になる。

## 8 まとめ

本研究では高強度、超短パルスのレーザー開発を近赤外から紫外域、sub-J 級の高エネルギーパルスから 5kHz の高繰返し高平均出力にまで渡って行った。これらのレーザーは高次高調波実験、イオン化実験に用いられて多くの成果を挙げており、今後ますますその有用性を増していくと思われる。

本研究は東京大学物性研究所先端分光部門 (旧極限レーザー) 渡部研究室に於て行われたものであり、ここで述べられた成果のすべては東京大学教授渡部俊太郎先生の指導にもとづくものです。筆者はここであらためて渡部先生に感謝の意を表したいと思います。