

# 解説

## 超短パルスチタンサファイアレーザー

猿倉 信彦\*・石田 祐三\*\*

\* 理化学研究所フォトダイナミクス研究センター 〒980 仙台市青葉区長町 13-1399

\*\* NTT 光エレクトロニクス研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1993年8月3日受理)

### Ultrashort Pulse Ti : Sapphire Lasers

Nobuhiko SARUKURA\* and Yuzo ISHIDA\*\*

\* Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research,  
19-1399, Nagamachi Koeji, Aoba-ku, Sendai 980

\*\* NTT Opto-electronics Laboratories, 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-01

#### 1. はじめに

チタンサファイアレーザーは、1982年にMITのP. F. Moultonにより開発された波長可変固体レーザーである。波長可変幅は、 $0.67\sim 1.1\mu\text{m}$ と同じ近赤外域の色素レーザーに比べ3倍程度広い<sup>1)</sup>。その広い利得帯域幅を生かした超短パルス発生が近年可能となり、従来の標準的超短パルス光源であった色素レーザーにとって代りつつある<sup>2)</sup>。本解説では、チタンサファイアレーザーと従来の色素レーザーにおける超短パルス発生メカニズムの違いと、超短パルスチタンサファイアレーザーにより実現された様々なレーザーシステムを概観し、さらに今後の新固体超短パルス光源の発展の展望について記す。

#### 2. チタンサファイアの特徴

チタンサファイアの活性イオンである  $\text{Ti}^{3+}$  は、一つの3d電子を最外殻とし、サファイアの結晶場により広がったフォノン終準位により4準位 ( ${}^2E_g\text{-}{}^2T_{2g}$  遷移) を形成する。チタンサファイアの特徴として、傑出して広い利得帯域幅、クロムアレキサンドライト等の同じ波長域のフォノン終準位波長可変固体レーザーに比べ1桁以上大きい誘導放出散乱断面積 ( $3\times 10^{-10}\text{cm}^2$ ) と、固体レーザーとしては短い蛍光寿命 ( $3.2\mu\text{s}$ ) があげられる。大きい誘導放出散乱断面積に対応し飽和フルーエンスはNdガラスより1桁程度小さい ( $1\text{J/cm}^2$ )。これらの特性

は、一般的な固体レーザー媒質と色素レーザー媒質の中間に位置し、固体媒質としては高利得であり、有機色素に比べ利得飽和は起こりにくいことを示している。その他の特性として、有機色素レーザーやカラーセンターレーザーと異なり通常の使用条件では媒質の劣化がないことや、ホスト結晶のサファイアの優れた機械的特性と高い熱伝導性があげられる。また、その励起源には、Arレーザー、銅蒸気レーザー、Nd:YAG/YLFレーザーの第二高調波等の標準的な可視高出力レーザーが使用可能であることも実用上重要である。

チタンサファイアの開発当初は、発振波長域での残留損失の問題があった。しかし現在では、結晶成長技術および結晶成長後の還元雰囲気中でのアニール技術の確立により、FOM値 ( $\alpha_{490}/\alpha_{800}$ ; 発振波長と励起波長における吸収係数比) 400程度の低残留損失の結晶が、チョコラルスキー法 (主に米国ユニオンカーバイド社) およびHEM法 (主に米国クリスタルシステム社) により作製可能である。これらの低残留損失の結晶を用いることにより、パルス発振、cw発振ともに30%程度の高効率発振が実現された。また、需要が高まりつつある増幅器のための高濃度チタンサファイア結晶の開発も近年進み、約200倍の単光路利得 (両側励起) が達成された<sup>3)</sup>。

#### 3. 従来の超短パルスレーザー光源技術<sup>4)</sup>

光は時間領域あるいは周波数領域での電磁波として双方から記述することが可能であり、時間領域での記述と

周波数領域での記述はフーリエ変換で結ばれている。そのため、時間領域で短い光パルスを発生させるには周波数(波長)領域でコヒーレントな(位相のそろった)広いスペクトル幅をもつ光を発生させることが必要である。

レーザー発振器から直接、短パルスを得る代表的な方法としてモード同期法が知られている。また先に述べたように短パルスを発生させるためには、広い利得帯域幅をもつ有機色素のようなレーザー媒質が不可欠である。

このため従来の超短パルス技術のほとんどはモード同期色素レーザーを基礎とするものであり、Forkらによる衝突モード同期リング色素レーザー(CPM色素レーザー)と、モード同期Ndレーザーの第二高調波による同期励起色素レーザーにより代表される。この際の短パルス化の主たるメカニズムは、利得色素での利得飽和と可飽和色素での吸収飽和である。さらに共振器内プリズム対で群速度分散を補償しパルス広がりや抑制することによりCPM色素レーザーで27フェムト秒が達成された<sup>9)</sup>。また、超短パルス発生においては、モード同期法に加え、石英光ファイバーを用いたパルス圧縮も重要な要素技術である。パルス圧縮とは、強度の高い短パルスを非線形媒質の導波路に導入し、自己位相変調効果により周波数領域でのスペクトルの広がりを誘起し、その後の分散補償により、入力パルスより短いパルスを得る技術である<sup>6)</sup>。このような非線形過程を用いたパルス圧縮を効果的に行うには、色素レーザーのピーク出力では十分でなく、多くの場合、銅蒸気レーザー励起の色素の多重光路増幅器が用いられた<sup>7)</sup>。そして、1987年にはForkにより、衝突モード同期色素レーザー、銅蒸気レーザー励起の多重光路色素増幅器、3次の位相補償を含むパルス圧縮の組合せで、600nmでの光の3サイクルに相当する6フェムト秒の極短パルスが発生された。現在のところ、これが人類により得られた最短光パルスである<sup>8)</sup>。

このように1980年代に成熟した超短パルス技術も、有機色素のレーザー媒質としての特性に起因する限界といくつかの問題点があった。まず、超短パルス動作時には、利得色素の利得帯域幅や、波長に大きく依存する可飽和吸収色素の特性により、波長可変領域を広くとることは困難であった。また、利得飽和が起こりやすいため固体レーザーやエキシマレーザーのような大出力化は不可能であった。そしてなによりも有機色素自体の劣化のための頻繁な色素交換や、安定した短パルス動作のための繊細な調整も研究の能率を大きく低下させた。これらの要因が超短パルス技術の一般化を大きく阻害してい

た。そして、この問題点や限界を解決するために、多くの超短パルスレーザー研究者が、1980年代の後半に、利得帯域幅が色素よりも広く劣化のない固体レーザー媒質であるチタンサファイアに関心を寄せ始めた。

#### 4. 超短パルスチタンサファイアレーザー

##### 4.1 モード同期チタンサファイアレーザー

1990年に始まる超短パルスチタンサファイアレーザーの劇的な発展の背景には、色素レーザーにより蓄積された超短パルスレーザーの要素技術の蓄積とチタンサファイア結晶の品質向上がある。ここでは、従来のモード同期色素レーザーとモード同期チタンサファイアレーザーの、光源としての質的な違いと、モード同期と短パルス化のメカニズムの違いをまず概観する。

当初、超短パルス発生に関しては、有機色素レーザーの場合と異なって、利得飽和が起こりにくく蛍光寿命も長いこと、広い利得帯域幅にもかかわらず短パルス発生は難しいと考えられていた。そのため、カラーセンターレーザーで実証されたAPM法による、1ピコ秒程度が最短パルスであった<sup>9,10)</sup>。しかし、再生モード同期法(スペクトラフィジクス)<sup>11)</sup>、可飽和色素を用いた受動モード同期法(NTT)<sup>12)</sup>およびモード同期のための素子をいっさい付加しない自己モード同期法(英国セントアンドリュース大)<sup>13)</sup>により、従来のモード同期とは質的に異なった超短パルス発生が、1990年のICUP、CLEOで相次いで報告された。その数カ月後には短パルス動作のメカニズムがほぼ説明された<sup>14)</sup>。

超短パルス光源として、色素レーザーと比較した場合、チタンサファイアレーザーは格段に優れた波長可変域の広さと波長可変の容易さ、安定性、ノイズレベルの低さを有している。また、正に絵にかいたようなサイドロブや裾がまったくない100フェムト秒程度の $\text{sech}^2$ 波形のパルスと、色素レーザーより約1桁高い平均出力( $\sim 1$ W)が得られる。ピーク出力は100kWに近く、モード同期色素レーザーの場合とことなり増幅なしで高効率の波長変換やパルス圧縮が行える。

次に、モード同期および短パルス化のメカニズムの違いについて考察を加える。超短パルス色素レーザーとチタンサファイアレーザーの構成上、最も大きな違いは、共振器内の大きな非線形効果である。レーザー媒質自体や溶媒の非共鳴なカー効果による非線形屈折率( $n_2$ )はサファイアもエチレングリコールも同程度であるが、媒質の有効長( $L$ )がおおよそ2桁程度チタンサファイアレーザーが大きい上に、共振器光強度( $I$ )も1桁以上大

きいたために、非線形効果の程度を示すこれらの積 ( $n_2 \cdot L \cdot I$ ) はきわめて大きく、チタンサファイアレーザーにおけるモード同期のメカニズムを理解する上で大きな意味をもつ。各種のモード同期チタンサファイアレーザーに共通の短パルス化のための必要要因は、大きな  $n_2 \cdot L$  積をもつチタンサファイアの結晶自体とプリズム対や GT 干渉計による群速度補償光学素子のみである。モード同期チタンサファイアレーザーの超短パルス発生機構については、チタンサファイア自体の空間的なカー効果<sup>2,14)</sup> と時間的なカー効果<sup>12)</sup>、および共振器内での負群速度分散の協調によるものと説明されている。ここで、空間的なカー効果(カーレンズ効果)とは、光強度の違いで、カー効果によるビームの自己集束性が異なることである。

別の言い方をすると、チタンサファイアの結晶がカー媒質であるため、レーザー光が強い位置の屈折率増加をもたらし、あたかも光強度により焦点距離が異なる GRIN レンズのようにチタンサファイアの結晶が機能する。そこで光強度が強いときに共振器損失が少なくなるように共振器を設定すれば、共振器損失がパルスの裾とピーク位置では変化しカー媒質が高速の損失変調素子あるいは可飽和吸収体として機能するため、短パルス化がはかれる。また、時間的なカー効果とは、カー媒質での自己位相変調効果により位相相関のあるスペクトル広がり誘起されることである。そして、共振器内で負の群速度分散により適切な位相補償を行うことにより、フーリエ限界に近い超短パルスの直接発生が可能となる。

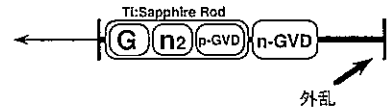
このようなメカニズムで各種のチタンサファイアレーザーからの短パルス発生が統一的に説明されている。上記の短パルス化機構が機能するためには、なんらかの初期モード同期過程により、レーザー媒質自体の非線形性が機能する程度に共振器内光強度を高める必要がある。この定常状態に至る前のパルス形成の初期過程のみが、各種方法で異なるものと考えられている。そして従来知られていたほとんど全てのモード同期方法と、いくつかの新しい方法が試され、フェムト秒動作が実現されている。

ここでは各種のモード同期チタンサファイアレーザーのモード同期開始メカニズムとその特徴について概観する(図1)。

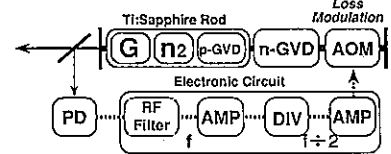
#### ① セルフモード同期<sup>13)</sup>(カーレンズモード同期: KLM<sup>15)</sup>)

共振器を延長し、プリズム対による群速度補償を行い、意図的なミスアライメントや機械的衝撃でモード同

#### ① セルフモード同期(カーレンズモード同期)



#### ② 再生モード同期



#### ③ 可飽和吸収体を用いた受動モード同期

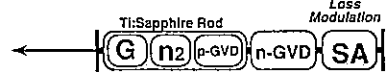


図1 フェムト秒チタンサファイアレーザーの模式図(G:利得,  $n_2$ :光非線形性, p-GVD:正分散, n-GVD:負分散, SA:可飽和吸収体)。チタンサファイア結晶と負分散のみが超短パルス発生の本質に寄与しており、各種方法でモード同期開始メカニズムのみに違いがある。①セルフモード同期(カーレンズモード同期)<sup>13,15)</sup>:外乱によりcw発振からモード同期発振に移行する(詳細な構成は、図2参考)。発振状態のモニターとcw発振に戻った時に外乱を与える機構、モード同期動作とcw動作時のビーム径の差を選択する共振器内スリットなどが、安定化のためには必要である。②再生モード同期<sup>11)</sup>:モードビームを検出しその周波数を半分に分周し増幅した出力によりモードロッカーに変調をかけモード同期を開始する。強制モード同期と異なり、共振器長の微調の必要がない。③可飽和吸収体を用いた受動モード同期<sup>12)</sup>:可飽和吸収体による強度変調によりモード同期を開始する。波長可変領域は可飽和吸収体の特性によりある程度制限されるが、きわめて簡易で安定性が高い。

期を開始する。まったく従来の色素レーザーのモード同期とは異なった新しいモード同期法である(図2)。しかしながら、モード同期開始の問題のみならず、安定性に関してもモード同期動作は容易にcw発振動作に戻りやすいという問題があった。その後、コヒーレント社の製品において、cw発振時とモード同期時のカーレンズ効果による共振器内ビーム径の違いを、共振器内スリットで選別することによる安定化と、共振器内モードドラッグによる機械的衝撃に代るモード同期開始機構の付加により、上記の問題が緩和された。

#### ② 再生モード同期<sup>11)</sup>

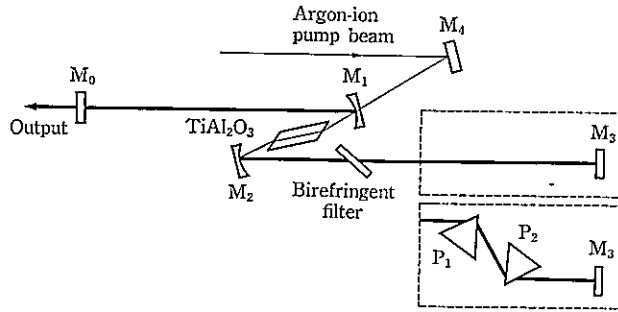


図2 セルフモード同期チタンサファイアレーザー<sup>13)</sup>。共振器長，プリズム対を除けば cw チタンサファイアレーザーと同じである。報告当初，メカニズムがわからずマジックモード同期と言われていた。

スペクトラフィジックスにより開発された方法で，共振器中に変調素子を含む点では従来の強制モード同期と同じであるが，縦モードビートの周波数の2分周することによりモード同期周波数としているため，共振器長を厳しく合わせなくても超短パルス動作が可能であるところが通常の強制モード同期より優れている。

### ③ 可飽和吸収体を用いた受動モード同期<sup>12)</sup>

可飽和色素ジェットを共振器内焦点位置に置くことによりモード同期を開始する。可飽和色素の特性によりモード同期可能な範囲に制約があるが，この方法の利点は，モード同期が確実にかかることと安定性と初期調整の容易さにある。

### ④ 同期励起モード同期<sup>21)</sup>

モード同期 Nd:YLF レーザーの第二高調波での同期励起により，セルフスタート可能なフェムト秒パルスが得られる。共振器長の精密な調整が必要であるのが難点である。

### ⑤ マイクロドットミラーモード同期<sup>19)</sup>

共振器中のエンドミラーを，レンズと焦点位置におかれた微小な円形ミラーで置き換えるのが特徴である。カーレンズ効果によるスポット径の違いにより短パルス動作の安定化をはかる。

### ⑥ アディティブパルスモード同期 (APM)<sup>9,10,16)</sup>

光ファイバーを用いた非線形結合共振器の使用により，モード同期を開始し同時に短パルス化を行う方法である。他の方法と異なり，APM 自体にも波長依存性のない短パルス化のメカニズムが備わっており，しかも受動的にモード同期の開始（セルフスタート）が可能である。APM の機構では，ファイバー中での自己位相変調効果と正分散でチャープした結合共振器のパルスと主共振器のパルスの干渉効果で，パルスの裾を弱めピークを強めることにより短パルス化が行われる。干渉効果を利

用しているので安定動作のためには，共振器長のフィードバック機構が必要である。

### ⑦ 結合共振器モード同期<sup>17,18)</sup>

結合共振器の共振器長を可変フィードバックを主共振器にかけモード同期を開始する。ピコ秒領域では断続的で不完全であるが，フェムト秒領域では完全なモード同期になる。波長依存性のない開始メカニズムがこの方法の利点である。

### ⑧ 共鳴受動モード同期 (RPM)<sup>20)</sup>

結合共振器に化合物半導体の可飽和吸収体をおきモード同期を開始する方法。

以上のような様々な方法でチタンサファイアレーザーから 100 フェムト秒パルス以下の発生が可能となった。これらの雑多な方法の特徴を，セルフスタートする（受動的にモード同期発振する）モード同期かであるかどうか，モード同期のメカニズムに波長制約があるかないか，微妙な調整要素が存在するか否かなどでまとめると，表1のようになる。また，カーレンズモード同期法と，再生モード同期法，可飽和吸収体を用いた受動モード同期法については，これらの方法によるレーザーが製品化されており，これらのモード同期法の総合的な使いやすさの指標となっているであろう。

次に極短パルス化の現状と問題点について考察することにする。チタンサファイアの利得帯域幅からの到達限界パルス幅はおおよそ 3 フェムト秒であるが，このような極短パルス発生のためには 2 次の群速度分散の補償の他に，3 次の群速度分散の補償が必要となってくる。その具体的方法としては，GT 干渉計とプリズム対の併用<sup>22)</sup>，群速度補償プリズム対の材質の最適化<sup>23)</sup>，共振器外分散補償の併用<sup>24)</sup>，4 個の石英プリズムによる群速度補償などがあげられる<sup>25)</sup>。現在，このような方法で得られている最短パルスは，11 フェムト秒であり，共振器ミラーの

表1 各種モード同期方法の比較

モード同期法	メカニズムの波長依存性 (○なし)	セルフスタート	簡便さ	安定性	自作の難易度 (○簡単)
① セルフモード同期 カーレンズモード同期	○	×	○	△	△
② 再生モード同期	○	○	○	○	×
③ 可飽和色素による受動モード同期	×	○	○	○	○
④ 同期励起モード同期	○	○	×	×	×
⑤ マイクロドットミラーモード同期	○	×	×	?	×
⑥ アディティブパルスモード同期	○	○	×	×	×
⑦ 結合共振器モード同期	○	○	△	△	△
⑧ 共鳴受動モード同期	×	○	×	×	×

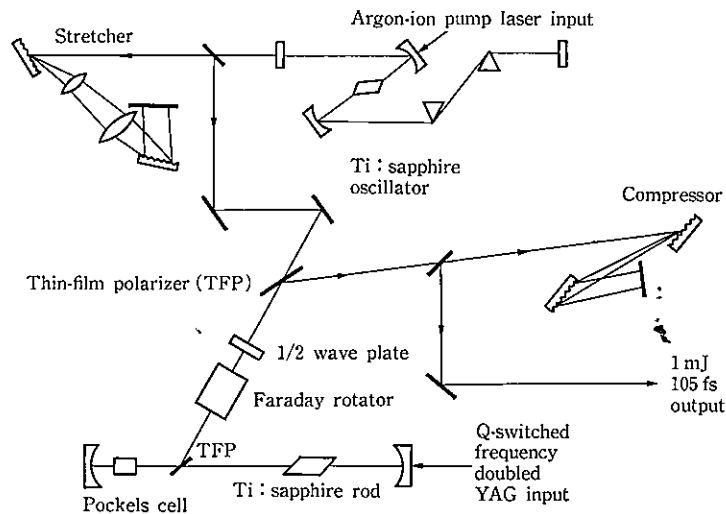


図3 CPAを施した、チタンサファイア再生増幅器<sup>28)</sup>。フェムト秒パルスを直接増幅すると高いピーク強度と光学素子の非線形性のため、ビームの波面がひずみ制御不能となる。それを避けるためチャープパルス増幅法では、まず短パルスをパルスストレッチャーで正のチャープをあたえパルス幅を広げてピーク出力を十分低く抑えた上で、パルスのエネルギーを増幅し、最後にパルス圧縮を行いパルス幅を元に戻すことにより高いピーク出力を発生させることを可能としている。ここに示された例では、フェムト秒チタンサファイアレーザーを発振段とし、Qスイッチ YAG レーザーの第二高調波励起のチタンサファイア再生増幅器を用いることにより、1 mJ/100 fs の出力を得ている。

帯域でほぼ限定されている<sup>29)</sup>。さらなる極短パルス化のためには広帯域高反射率ミラーの作成技術も問題となるであろう。

#### 4.2 チタンサファイア増幅器

チタンサファイアは、有機色素に比べ飽和フルーエンスも高く、利得帯域幅も大きいいため、超短パルス光の波長可変の大出力増幅に使用が可能である<sup>3)</sup>。また、チタンサファイア増幅器では、パルス YAG/YLF レーザーの第二高調波や、銅蒸気レーザー、クマリン色素

レーザー、アルゴンレーザーなど多様な励起源が使用目的により選択可能である。

高利得チタンサファイア増幅器は、おもに再生増幅方式や多重光路増幅方式に大別される。再生増幅とは、モード同期レーザーのパルス列からの1パルスを再生増幅器の共振器に取り込み、飽和増幅に達するまで周回させ変調素子で取り出す増幅方法である。この増幅方法の利点は、高いエネルギー取出し効率にある。また、Qスイッチ YAG レーザーの第二高調波励起の 10 Hz~1

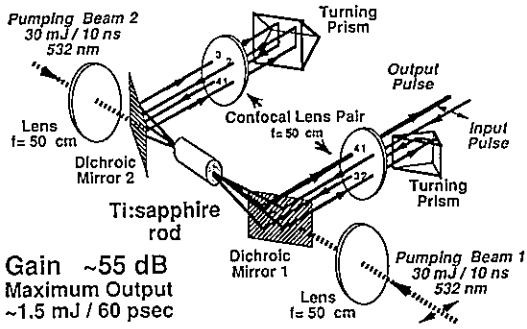


図4 共焦点4パスチタンサファイア増幅器<sup>32)</sup>。共焦点レンズ対とビームの平行移動のためのプリズム対を用い多重光路を構成する。Qスイッチ YAG レーザーの第二高調波をダイクロックミラーにてチタンサファイアレーザーのビームと重ねることにより励起を効率的に行う。また、両側励起により結晶の光学損傷の危険性を低く保ったまま高い単一光路利得が可能となる。この共焦点多重光路増幅方法を再生増幅法と比較した場合の利点は、波長可変とタイミング制御の容易さ、CPAの必要性の低さなどである。

kHz, 数 mJ クラス出力の増幅器<sup>27,28)</sup>から(図3), アルゴンレーザー励起の 250 kHz の数  $\mu$ J クラスの増幅器<sup>29)</sup>まで目的に応じた選択が可能である。多重光路増幅方式は、幾何学的に多重光路を形成した増幅方法であり、反射光学系を用いた共焦点多重光路増幅器<sup>29)</sup>、屈折光学系を用いた共焦点多重光路増幅器が考案されている<sup>30-32)</sup>(図4)。エネルギー取出し効率は再生増幅方式に劣るが、波長可変の容易さ、タイミング制御の容易さ、高いコントラストの単一パルス動作が利点である。

チタンサファイア増幅器の場合は、色素レーザーの場合と異なり、モード同期の際役にたった大きな  $n_2 \cdot L$  積をもつチタンサファイアの性質は、増幅系を構築する時には負の要因となる。すなわち、増幅された超短パルスのピーク強度によるビームの自己位相集束をさけるため、ガラスレーザーの場合と同様にチャープドパルス増幅方式(CPA)を行う必要がある<sup>33)</sup>。CPAとは、短パルスを回折格子対等の正分散によりチャープさせパルス幅を広げピーク強度を下げてから増幅し、その後回折格子対の負分散でパルス圧縮することにより高ピーク出力の超短パルス光をえる増幅方法である。CPAを適応した高利得の前駆増幅器と多段増幅系を併用することによりテラワット級にフェムト秒パルスを増幅することも可能である<sup>34,35)</sup>。従来、ガラスレーザーやエキシマレーザーの巨大システムを用いなければ不可能であった大出力レーザーシステムも、テーブルトップサイズで既に実

現されている。それだけでなく、大出力チタンサファイアレーザーシステムは、超短パルス大出力ガラスレーザーやエキシマレーザーシステムの前段としても用いられ、性能向上に寄与している<sup>36,37)</sup>。これらの大出力レーザーは、高次高調波発生<sup>37,38)</sup>やX線発生<sup>39)</sup>、レーザープラズマ発生等の研究に盛んに応用されている。

## 5. チタンサファイアレーザーと新固体レーザーの今後の発展と展望

一般的なチタンサファイアレーザーの研究開発は一段落した観がある。その結果、様々な優れた市販レーザーシステムが入手可能となっており、色素レーザーに代る超短パルス標準光源として定着しつつある。今後の研究のフロンティアは、さらなる極短パルス化や大出力システムの開発にあると思われる。極短パルス化に関しては、レーザー共振器から発生されるパルス幅はすでに色素レーザーより短くなっており、チタンサファイアの利得帯域幅のすべてを利用したモノサイクル光パルスの発生が次なる研究の焦点であろう。また、大出力化に関しても、近い将来、ガラスレーザーを超えるような高ピーク出力極短パルスレーザーシステムが、チタンサファイアレーザーと高飽和フルエンス増幅媒質の組合せにより波長可変性を保持したまま実現される可能性もあるであろう。

一方、チタンサファイアレーザーに始まった超短パルス固体レーザーの技術革新は、他の波長可変固体レーザーにも広がりつつあり、チタンサファイアレーザーで見いだされた新しいモード同期法も、これらの固体レーザーに適応されている。将来半導体レーザー励起が期待される  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$  ( $0.75\sim 1\ \mu\text{m}$ )<sup>40)</sup>のみならず、 $\text{Cr}^{4+}:\text{フォルステライト}$  ( $1.16\sim 1.32\ \mu\text{m}$ )<sup>41)</sup>や  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  レーザー ( $1.35\sim 1.55\ \mu\text{m}$ )<sup>42)</sup>で短パルスの発生が報告されている。新しい波長可変固体レーザー媒質の研究開発により、色々な波長域での極短パルス光が、固体レーザーとその波長変換により次々と実現されるであろう。

このようなチタンサファイアレーザーや超短パルス波長可変固体レーザーの発展により、分光学からX線発生にいたる広い研究の分野で、従来の超短パルス光源では不可能であったような研究が可能となり、さらに新しい超短パルス技術の応用の発展や一般化が期待される。

## 文 献

- 1) P.F. Moulton: "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:sapphire," J. Opt. Soc. Am. B, 3 (1986) 125-133.

- 2) "Special issue on ultrafast optics and electronics," ed. J.P. Heritage and M.C. Nuss, *J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992).
- 3) P. Deng, Y. Chai, F. Gan, N. Sarukura and Y. Segawa: "The growth of a high-concentration and high single-pass-gain Ti: sapphire crystal by the IFUS-method," to be submitted to *Advanced Solid-State Lasers '94*, Optical Society of America.
- 4) 例えば, *Ultrashort Light Laser Pulses and Applications*, ed. W. Kaiser (Springer-Verlag, 1988); 矢島達夫編: 超高速光技術 (丸善, 1990).
- 5) J. A. Valdmais and R. L. Fork: "Design considerations for a femtosecond pulse laser balancing self phase modulation, group velocity dispersion, saturable absorption, and saturable gain," *J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 112-118.
- 6) For example, W. J. Tomlinson, R. H. Stolen and C. V. Shank: "Compression of optical pulses chirped by self-phase modulation in fibers," *J. Opt. Soc. Am. B*, **1** (1984) 139-149.
- 7) W. H. Knox: "Femtosecond optical pulse amplification," *J. Quantum Electron.*, **QE-24** (1988) 388.
- 8) R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker and C. V. Shank: "Compression of optical pulses to six femtosecond by using cubic phase compensation," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 483-485.
- 9) P. W. M. French, J. A. R. Williams and J. R. Taylor: "Femtosecond pulse generation from a Ti: sapphire laser using nonlinear external cavity feedback," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 686-688.
- 10) J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto and P. A. Schulz: "Femtosecond mode-locked Ti: sapphire laser with a nonlinear external cavity," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 1125-1127.
- 11) J. D. Kafka, M. L. Watts and J. Pieterse: "Picosecond and femtosecond pulse generation in a regeneratively mode-locked Ti: sapphire laser," *J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992) 2151-2162.
- 12) Y. Ishida, N. Sarukura and H. Nakano: "Soliton-like pulse shaping in a cw passively mode-locked Ti: sapphire laser," *Ultrafast Phenomena VII* (Springer-Verlag, Berlin, 1990) pp. 75-77; N. Sarukura, Y. Ishida and H. Nakano: "Generation of 50-fsec pulses from a pulse-compressed, cw, passively mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 153-155; N. Sarukura and Y. Ishida: "The pulse evolution dynamics of a femtosecond passively mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 61-63.
- 13) D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbett: "60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 42-44.
- 14) M. Piche, N. McCarthy and F. Salin: "Pulse narrowing in mode-locked lasers through polarization and transverse effects," *OSA Annual Meeting (1990) Paper MB 8*.
- 15) L. Spinelli, B. Couillaud, N. Goldblatt and D. K. Negus: "Starting and generation of sub-100 fs pulses in Ti: sapphire by self-focusing," *CLEO '91* (1991) Paper CPDP 7.
- 16) D. E. Spence and W. Sibbett: "Femtosecond pulse generation by a dispersion-compensated, coupled cavity, mode-locked Ti: sapphire laser," *J. Opt. Soc. Am. B*, **8** (1991) 2053-2060.
- 17) P. W. M. French, S. M. J. Kelly and J. R. Taylor: "Mode-locking of a cw Ti: sapphire laser using a linear external cavity," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 378-380.
- 18) W. S. Pelouch, P. E. Powers and C. L. Tang: "Self-starting mode-locked ring-cavity Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1581-1583.
- 19) G. Gabetta, D. Huang, J. Jacobson, M. Ramaswamy, E. P. Ippen and J. G. Fujimoto: "Femtosecond pulse generation in Ti: sapphire using a microdot mirror mode locker," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1756-1758.
- 20) U. Keller, G. W. Thooft, W. H. Knox and J. E. Cunningham: "Femtosecond pulses from a continuously self-starting passively mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1022-1024.
- 21) C. Spielmann, F. Krausz, T. Brabec, E. Winter and A. J. Schmidt: "Femtosecond pulse generation from a synchronously pumped Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1180-1182.
- 22) J. M. Jacobson, K. Naganuma, H. A. Haus, J. G. Fujimoto and A. G. Jacobson: "Femtosecond pulse generation in a Ti: sapphire laser by using second and third-order intracavity dispersion," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1608-1610.
- 23) B. E. Lemoff and C. P. J. Barty: "Generation of high-peak-power 20-fs pulses from a regeneratively initiated, self-mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1367-1369.
- 24) F. Krausz, M. E. Fermann, T. Brabec, P. F. Curley, M. Hofer, M. H. Ober, C. Spielmann, E. Winter and A. J. Schmidt: "Femtosecond solid state lasers," *J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992) 2097-2122.
- 25) B. Proctor and F. Wise: "Quartz prism sequence for the reduction of cubic phase in a mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1295-1297.
- 26) M. T. Asaki, C. P. Huang, D. Garvey, J. Zhou, H. C. Kapteyn and M. M. Murnane: "Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 977-979.
- 27) G. Vailancourt, T. B. Norris, J. S. Coe, P. Bado and A. Brun: "Operation of a 1-kHz pulse pumped Ti: sapphire regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 317-319.
- 28) J. Squier, F. Salin and G. Mourou: "100-fs pulses generation and amplification in Ti: sapphire," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 324-326.
- 29) T. B. Norris: "Femtosecond pulse amplification at 250 kHz with a Ti: sapphire regenerative amplifier to continuum generation," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 144-146.
- 30) P. George, F. Estable, F. Salin, J. P. Piolet, P. Grangier and A. Brun: "High-efficiency multipass Ti: sapphire amplifiers for a continuous-wave single-mode laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 144-146.
- 31) N. Sarukura and Y. Ishida: "Ultrashort pulse generation from a passively mode-locked Ti: sapphire laser based system," *J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992) 2134-2141.
- 32) N. Sarukura, Y. Segawa and K. Yamagishi: "Ti: chrysoberyl as a high saturation fluence amplification medium for Ti: sapphire lasers," *Advanced Solid-State Lasers '93 (OSA, 1993) Paper ATuD 3*.

- 33) D. Strickland and G. Mourou : "Compression of amplified chirped pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219.
- 34) J. D. Kmetec, J. J. Macklin and J. F. Young: "0.5 TW, 125-fs Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1001-1003.
- 35) A. Sullivan, H. Hamster, H. C. Kapteyn, S. Gordon, W. White, R. J. Blair and R. W. Falcone: "Multi-terawatt 100 fs Ti: sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1406-1408.
- 36) C. Rouyer, E. Mazataud, I. Allais, A. Pierre, S. Seznec, C. Sauteret, G. Mourou and A. Migus: "Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti: sapphire/Nd: glass chain," *Opt. Lett.*, **18**(1993) 214-216.
- 37) K. Kondo, N. Sarukura, K. Sajiki and S. Watanabe: "High-order harmonics generation by ultrashort KrF and Ti: sapphire lasers," *Phys. Rev. A*, **47** (1993) R 2480-2483.
- 38) J. J. Macklin, J. D. Kmetec and C. L. Gordon: "High-order harmonic generation using intense femtosecond pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 766-769.
- 39) J. D. Kmetec: "Ultrafast laser generation of hard x-rays," *J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992) 2382-2387.
- 40) N. H. Rizvi, P. M. W. French and J. R. Taylor: "Generation of 33-fs pulse from a passively mode-locked Cr: LiSAF laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1605-1607.
- 41) A. Seas, V. Petricevic and R. R. Alfano: "Self-mode-locked chromium-doped forsterite laser generates 50-fs pulses," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 891-893.
- 42) H. Nethel, A. Sennaroglu and C. R. Pollock: "Mode-locked Cr<sup>++</sup> solid state lasers," *Optical Society of America Annual Meeting* (1993) Paper WNN 2.