レーザー装置の基礎 III — 超短パルス超高強度レーザー —

阪部 周二, 中井 貞雄

大阪大学大学院 工学研究科, 大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6)

Fundamentals of Lasers III: Ultra-Short High-Intensity Lasers

Shuji SAKABE and Sadao NAKAI

Department of Electromagnetic Energy Engineering and Institute of Laser Engineering, Osaka University
2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received October 1, 1998)

1. レーザー出力形態とパワー

レーザー出力の形態には2種類ある. 連続(CW)光とパルス光である. レーザー媒質を時間的に一様連続に励起すると, 共振器内部に存在できる光の周波数(縦モード)が単一の場合, 出力光は単一周波数光であり, これが純粋な連続光である. また, いくつもの縦モードが存在して, 各モード間の位相がランダムな場合や, 励起が時間的に一様でない場合も, 出力光の時間波形は一定ではないが連続的になるので, このような場合も連続光という. 一方, 複数縦モード間の位相が揃っている場合(モード同期)は, 出力はパルス列になる. 周波数スペクトルは有限の幅をもった離散的(櫛状)スペクトルになる. このようなパルス列から, 単一パルスを切り出したものがパルス光であり, 周波数スペクトルは有限の幅をもった連続スペクトルになる. レーザー媒質への励起が時間的にパルス的な場合も, 出力がパルスになる. また, 共振器の光損失を大きくしておき, 十分な励起により, 大きな反転分布をつくって, いっきに出力するQ-スイッチ発振からもパルス光がでる. Fig.1には各種出力時間波形とそのスペクトルを示す.

連続光のパワーは時間平均した平均パワーで表す. 繰り返しパルス列(連続パルス)は平均パワーとパルスのピーク(尖塔)パワーで表される. 単一パルスの場合のパワーはピーク(尖塔)パワーである.

2. MOPA 装置

Q-スイッチレーザーから発するパルスのパルス幅は数 ns, エネルギーは数10mJ程度である. また, YAGレーザーなどのモード同期レーザーからは, パルス幅数~100ps, パルス当たりエネルギー数10nJ程度の出力である. いずれにしても, そのピークパワーはkW~MWにとどまる. さらに

に大きいエネルギーや, 高いパワーを得るには, これらのパルスを増幅しなければならない. 発振器と増幅器を組

Fig.1 Laser output waveforms (left) and their spectra (right).

み合わせたものをMOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) 装置という (Fig.2). 市販のQ-スイッチレーザーも数100mJを超えるものは1~2台の増幅器を装備したMOPA構成になっている。この増幅器の段数を増やせば、より大きなエネルギーを得ることができるのであるが、パルスのエネルギー(パワー)密度(ビームの単位断面積当たりのエネルギー(パワー))が大きくなると、パルス自身が増幅器を破壊することになる。これを避けるために、各増幅器の間の適当な位置に、ビーム拡大器(ビームエキスパンダー)を配して、ビーム径を大きくし、エネルギー密度を減じる。つまり、レーザー装置から取り出せるエネルギーはビーム径、すなわちどれだけ大きな光学素子を作ることができるかにより決まる。Fig.3は大型レーザーの代表である核融合プラズマ実験用レーザー装置について、世界の主要装置のビーム径と出力エネルギーの関係を示す。現在、ガラス、石英などを母材とした光学素子の損傷閾値は10 J/cm²を超えるが、ビームの空間強度分布などを考慮すると、実際の装置では、5J/cm²程度として設計されている。1kJの出力を得ようとすると1kJ/5J/cm² = 直径16cm程度の

Fig.2 MOPA system.

ビームを出せる光学素子が必要となる。Fig.4は核融合実験用大出力レーザー装置の発展を示す。この発展は光学素子の大型化技術の進展が在って初めて可能となったのである。米国において現在建設中の核融合実験装置：国立点火施設(NIF)はMJの出力が期待されているが、これは192ビーム装置であり、各ビームの増幅器もセグメント構成になっているので、実効的なビーム当たりの径は大きくない。現在のところ、高品位な光学素子としては1m×1m程度の大きさが限度である。つまり、パルス光としては1ビームあたり10kJ程度が現状での限界である。パルス幅を1nsとすると、このパルスのピークパワーは10TW (TW = テラワット = 10¹²W) にとどまる。

3. 超短パルスレーザー

慣性核融合実験のように、大きな高温プラズマを生成するためには大きなエネルギーのパルスを出せるレー

Fig.3 Beam diameter and output energy per beam of laser-fusion experiment facilities.

Fig.4 Progress of laser facilities for inertial confinement fusion research.

ザーが必要である。しかし、高いピークパワーを出すことができるのはこのような大型装置だけではない。

レーザー光の短パルス化は、Q-スイッチ発振により μs から ns に、モード同期発振により ns から ps へと進展してきたが、この数年の間に、さらに ps から fs へと短くなってきた(Fig.5)。これは、広い蛍光スペクトルをもつチタンサファイアに代表される遷移金属イオンドープ結晶の開発が飛躍的に進んだためである。このような結晶を媒質に、波長分散補償素子を組み入れた共振器を組めば、 10fs 以下のパルスが発生できる。典型的なモード同期YAGレーザーのパルス幅は 100ps であるので、同じパルス当たりエネルギーでもピークパワーにして 10^4 倍高くできる。しかし、発振器単体ではピークパワーは 1MW にとどまる。より、高いピークパワーを得るためには、やはり増幅器が必要である。つまり、MOPA構成にしなければならない。ただ、 ns パルスの場合とは異なり、ピークパワーは発振器を出たところで、既に MW レベルであるので、例えば、利得 10^3 の前段増幅器を通過するだけで GW レベルに達するため、簡単に光学的な損傷や非線形効果をきたしてしまう。そのため、ピークパワーを減じて増幅しなければならないが、前述のMOPAで述べた、ビームエキスパンダーによるビーム径の増大では、非現実的な大きさの光学素子が必要となる。

4. CPA レーザー

MOPA構成によりパルスを効果的に増幅するために、パルス幅を大きくすることによりパルスのピークパワーを減じる。これがCPA (Chirped Pulse Amplification)である(Fig.6)。発振器から出た超短パルスを正の分散特性(長波

Fig.5 Pulse-duration is being shortened by breakthrough with Q-switch, Mode-locking, and broadband crystals.

Fig.6 CPA-MOPA system.

長側が短波長側よりも進む)をもつ素子にいれ、パルスの時間幅を広げることができる(Fig.7)。これにより、例えば、 1000 倍に広げれば、ピークパワーも $1/1000$ に減じられる。こうした、パルスを増幅器列にいれ、増幅されたパルスを、負の分散特性(短波長側が長波長側よりも進む)の素子にいれ、パルスを再圧縮すれば、高いピークパワーを得ることができる。

パルス幅が小さいので、例えば 100fs の場合、わずか 100mJ のエネルギーで TW が得られる。 100mJ のエネルギーを出すMOPAはテーブルトップのサイズに組むことができるので、極めてコンパクトな高強度レーザーが実現している。広い蛍光スペクトルをもつ遷移金属イオンドープ結晶とCPA概念とが相まって、レーザーのピークパワーは飛躍的に向上したのである(Fig.8)。Fig.9は、世界の主な超短パルスレーザーのピークパワーと繰り返しを示している。CPA方式と核融合実験用装置MOPAを組み合わせることで、 PW ($\text{PW} = \text{ペタワット} = 10^{15}\text{W}$)以上の出力も達成されている。Fig.10, 11はそれぞれ大阪大学のテーブルトップ超短パルス高強度チタンサファイアレーザーと高速点火実験用短パルス超高強度ガラスレーザーである。

Fig.7 Pulse can be stretched or compressed by using the element of which dispersion has strong wavelength dependence.

Fig.8 The potential of peak power was gone across by the invention of CPA-concept.

Fig.9 Review of ultra-short high-intensity pulse lasers.

Fig.11 PW-module and Gekko XII glass laser facility in Osaka University.

Fig.10 Table-top TW Ti-sapphire laser in Osaka University.

5. CPA-MOPA 装置

短パルスにより高いピークパワーを得るためのCPA-MOPA装置を構成するための要素について概説する(詳細は参考文献1及び同文献に上げられている文献参照)。

モード同期発振器により発生された超短パルス光(数10fs~1ps)をパルスストレッチャーによりそのパルス幅をひろげる。これにより、増幅段でのパルス光のピークパワーを従来の高出力MOPAレーザーシステムのもの程度にできる。ストレッチャーを出たパルスのエネルギーはnJレベルと小さいので、後段のパワー増幅器により効率的に増幅できる程度(数mJレベル)までに、前置増幅器によって増幅する。パワー増幅器により、十分なエネルギーを得たパルス光はパルスコンプレッサーにより、もとのパルス幅程

度にまで再圧縮され、100GWからPWレベルのピークパワーが達成できる。

超短パルス発生が行われた主な結晶には Ti^{3+} , Cr^{4+} , Cr^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} といった遷移金属をドープしたサファイア、YAG, ガラスなどの母材が報告されている。しかし、将来全固体化(レーザー励起)システムを考えた場合、緑色の高出力半導体レーザーが出現すれば、チタンサファイアは代表的な結晶になるであろう。チタンサファイアの蛍光スペクトル幅は約200nmであるので、原理的には3.5-fsのパルスを発生できる可能性がある。数-fsへのブレイクスルーは発振器内部と出力ミラー内部で生じる高次の分散の補償をどのように行うかである。現在の最短パルスは、発振器単体からでは、6.5-fsであり、チャープミラー(負の分散特性をもった誘電体多層膜ミラー)と半導体可飽和吸収ミラーを用いて実現されたものである。筆者らは、すべて現在カタログにある市販の光学素子だけを用い、従来のプリズム対による分散補償により、10-fsの発生に成功している。

発振器からのパルス列は、必要に応じて適切な繰り返しで抽出する。このパルスをパルスストレッチャーによりパルス幅をひろげる。高いピークパワーを出せる装置では、ピークパワーを十分に下げておく必要があるので、ストレッチャーの伸延率も1000倍以上に大きくする。大きな分散特性を示す素子としては、現在のところ回折格子しかない(プリズムの分散は小さい)。典型的なストレッチャーの構成を Fig.12 (a)に示す。一般には、左右対称に配した2枚の回折格子とその間に配した倍率1の望遠鏡より構成される。このストレッチャーは発振器からのパルスを正方向に周波数チャープする。つまり、ストレッチャー内部で長波長側の光が短波長側の光よりも進む。コンプレッサーは、平行に配した2枚の回折格子だけで構成

Fig.12 Configuration of typical pulse stretcher (a) and its dispersion.

され、ストレッチャーと反対方向にチャープする。ストレッチャー内部の望遠鏡は、像反転により2枚目の回折格子の分散方向の波長依存性をなくすためのものである。Fig.12 (b)には中心波長800nmのパルスストレッチャーに入射したときの、時間遅延の波長依存性を示す。100-fs程度のパルスではスペクトルが8-nm程度であるので、この範囲ではほぼ線形な正のチャープが実現できることが分かる。

超短パルスはそのスペクトル幅が広いので、いかなる光学素子内でも分散(正の分散)が生じる。Fig.12 (a)に示すような、レンズの望遠鏡を用いると、レンズ内部での分散が問題となる他、回折格子での分散角が大きくなると、薄肉レンズによる近軸近似からはずれ、色収差が問題となる。このような問題点をなくすために、数10-fs以下のCPA-MOPAシステムでは、球面反射ミラーを用いたストレッチャーが用いられる。パルスコンプレッサーにはストレッチャーと同種の回折格子が用いられる。増幅されたパルスを再圧縮するために、回折格子の損傷閾値以下となるようにビーム径を広げなければならないので大型の回折格子が必要となる。現在、チタンサファイアレーザーシステムでは、金あるいは銀コートホログラフィック回折格子が広く用いられているが、パルス幅が数10-fs以下の場

合、機械加工型の回折格子も用いられている。損傷閾値の高い誘電体多層膜回折格子の開発もすすめられている。また、パルスを元のパルス幅程度に再圧縮する回折格子の前後ではピークパワーが極めて高くなるので、空気中での非線形屈折により波面が歪む可能性がある。そのため高いピークパワーの装置ではコンプレッサーを真空容器内に入れる必要がある。

ストレッチャーを出た光(nJレベル)を効率的に増幅するためには、パワー増幅器による飽和増幅の前に、前置増幅器による高利得の増幅が必要である。前置増幅器には再生増幅器や多重パス増幅器が用いられる。30fs以下の短パルス広スペクトルのパルスを増幅する場合、利得狭帯域化によるパルスの広がりが生じることがあるので、利得の大きい前置増幅器内にエタロン板などを挿入してスペクトルを制御する必要がある。システム全体の効率は一般のMOPA装置と同様、後段のパワー増幅器により決まる。代表的なものとして、テーブルサイズのチタンサファイアでは励起レーザー光から出力への効率は約40%程度、PW級の大型のガラスレーザーではフラッシュランプ入力から出力への効率は約5%程度である。

短パルスCPA-MOPA装置で最も重要な要素は、システム内の光学素子あるいは空気中で生じる高次の分散の補償である。分散がない場合は、ストレッチャーとコンプレッサーは全く対称分散特性を示すので、元のパルスにまで再圧縮される。しかし、システム内には多くの光学素子が用いられているので、そこで生じる分散はパルス幅を広げたり、形状を歪めたりする。これを補償して、可能な限り元のパルスに近付けることが重要な技術である。その方法としては、コンプレッサー自身の調整、分散特性既知の光学材料の挿入、ストレッチャー内部への分散特性既知の複合レンズの挿入などが行われている。

この5年の間に、テーブルトップのTWレーザーから大型のPWレーザーまで、超短パルス超高強度レーザーは飛躍的な進歩をとげ、その一部は市販品としても世に出されている。今後は、これらのレーザーがいかに広範な応用に結びつくかが重要なテーマである。レーザー加工、レーザー医療、レーザーエネルギー応用、レーザー核融合などすでに応用の端をきっているものもあるが、その潜在的な可能性はまだ十分に議論されていない。また、それを議論するためにもレーザーと物質との相互作用といった素過程を詳細に調べる基礎科学研究が重要であると筆者は考えている。

参考文献

- 1) 阪部 周二：レーザー研究 **25** (1997) 855.
他の多くの文献は本論文に詳しく掲載されている。
- 2) 阪部 周二：レーザー研究 **25** (1997) 224.