産業用超短パルスレーザーの現状と将来展望

浅川 雄一

ライテック(株) (〒224-0053 神奈川県横浜市都筑区池辺町4483-1)

Current Status and Future View of Industrial Ultra-Short Pulse Lasers

Yuichi ASAKAWA

Lightec Co., Ltd., 4483-1 Ikebe-cho, Tsuduki, Yokohama, Kanagawa 224-0053

(Received July 9, 2013)

Ultra-short pulse laser light sources have been used for scientific research for more than two decade. In spite of this fact, these light sources are not utilized for industrial application. This is because an old type of ones has instability, large foot print and higher price. Recently, various lasing medium, the type of lasing medium, stable oscillator and the way of mode locking enable to make not only ultra-short pulses stable, but a size of light sources compact and a price reasonable. In this paper, current status of industrial ultra-short pulse laser light source is introduced.

Key Words: Laser, Laser processing, Industrial ultra-short pulse laser

1. はじめに

超短パルスレーザー光の特徴は、短い時間のみ光を発生させる超短パルス性、広いスペクトル帯域を有する広帯域性、そして、高い電界強度が作り出せる高強度性であり、その特徴を生かすべく、1980年代後半から超短パルス発生、およびその増幅技術は急激に進展し、主に理科学研究用途に使用され始めた。超短パルス性を活かした応用例としては、超高速ダイナミクスの時間分解計測が代表的な例であり、Zweilが1999年にはノーベル賞を受賞している¹⁾。また、広いスペクトル特性を利用した応用例としては光周波数コムを用いた精密周波数計測が挙げられ、本研究においてもHänschが2005年にノーベル賞を受賞しており²⁾、超短パルスレーザーは先端理科学技術には欠かせない道具となっている。

加えて、高強度性は極短パルス領域となる単一アト秒パルス発生³⁾などの理化学応用にも活用されている一方で、物質に超短パルス光を照射した際に発生する多光子吸収過程に基づき、熱影響が軽微な加工が実現できる点、照射量に応じて加工穴径や深さを精密に調整できる点、加えて、若干の加工レートの違いはあるものの加工対象の材質を選ばない加工許容性が広い点より、超短パルスレーザーのレーザー加工分野での産業応用が期待されてきた⁴⁾。

しかしながら、元来、超短パルスレーザーは理科学用に開発されてきたため極限技術に近く、産業用途に活用するにはいくつかの課題があった。第一に安定な出力を得るためには微妙な光学調整が必要であり、かつ周辺温

度や湿度に対して敏感であることから長期的な出力安定性が低い点、第二に装置サイズが著しく大きい点、第三に機械加工と比べてコストが高い反面、低生産性であることが挙げられる。

2000年代に入り自動アライメント製造手法などの固体レーザー製造技術が向上し、また、超短パルスレーザー光学素子製造技術も分散補償用のミラーが市販され、さらに、温湿度に対して耐久性をもつ光学素子が開発されたことで一気に信頼性が向上した。加えて、超短パルス光発生に対して、Ti:sapphire結晶以外にも半導体レーザーにより直接励起が可能なNd系およびYb系固体レーザー結晶が活用され、またレーザー媒質の形状として比較的堅牢性が高いYb系およびEr系ファイバレーザー媒質も採用され始めた。さらに、ディスク形状やスラブ形状のレーザー媒質を利用した増幅器が開発されることにより超短パルスレーザーの高出力化が図られはじめたことで、前述の産業応用に対する課題が解決され始めた。

本稿では、近年著しく発展している産業用超短パルスレーザーの構成や製品に関する現状、および将来展望について解説する。

2. 産業用超短パルスレーザーの構成

2.1 概略構成と増幅方法

一般的に、超短パルスレーザーと称されるレーザー発振器のパルス幅はフェムト秒領域の場合が多いが、最近の産業用超短パルスレーザーのレーザー発振器のパルス幅は数十ps以下のパルス幅を発生する装置が一般的で

ある。加工品質に対するパルス幅の影響は、加工対象や目標とする加工品質に依存するところもあるが、パルス幅20 psを境にして変化が見られる報告がある⁵⁾。このため、本稿ではフェムト秒領域以上のパルス幅を有するレーザー発振器も産業用超短パルスレーザーに含めるものとして記載する。

特に超短パルスレーザーをレーザー加工に応用するためには、そのピーク強度が加工対象の加工しきい値を超える必要があり、増幅技術が不可欠となる。パルス幅が短くなればなるほど発生や増幅方法は複雑になり、最終段で得られるパルス幅により増幅方法はFig. 1に示す通りにわかれる。その理由として、パルス幅が短くなると、パルスのピーク強度がGW/cm²を超え、そのあたりから結晶や光学素子に損傷が発生する点と物質中の伝搬によりパルス特性が大きく変化する点がある点にある。

第一の課題である高いピーク強度に対して2つの対策があり、一つが空間的にレーザービームを拡大すること、もう一つが時間的にレーザーパルスを引き延ばすことによりピーク強度を下げる方法がある。前者の場合、レーザー装置や利得媒体が大きくなってしまいが、比較的一般的な装置構成であるMOPA (Master Oscillator Power Amplifier)型増幅⁶⁾となる。次に、時間的にパルス幅を伸ばすこととは、入力パルスに正の分散を与える伸張器でパルス幅を10³~10⁵倍に伸張させピーク強度を下げ、このパルスを増幅器により所定出力まで増幅させた後、逆に負の分散を与える圧縮器でパルスを圧縮させて高いピーク強度を得る。本手法がチャープパルス増幅法 (Chirped Pulse Amplification: CPA)⁷⁻⁹⁾である。

第二の課題であるパルス幅の伸張に関して、一般的にガラスをはじめとする多くの材料の可視から赤外波長域にかけて低周波数(長波長側)の光の位相が早く伝搬する正常分散の性質をもっているためパルス幅が広がる傾向にある。この現象は群遅延分散と呼ばれ、この現象を補償する手段の一つに分散補償コーティングが施された誘電体多層膜ミラーが開発されている。このミラーは多層膜の各層の膜厚を調整することで長波長側の光が基板内部で、短波長側の光が膜表面で反射することでガラスが持つ分散と逆の分散を持たせパルス波形を維持することが可能になる。特に100 fs以下のパルス幅を伝送する際は広い帯域を持つため、分散を考慮する必要がある¹⁰⁾。

また、超短パルスレーザー光は物質中の電子と応答し

て高周波分極を誘起し、3次の非線形分極によりレーザー光のピーク強度に依存して物質中で屈折率変化を引き起こす。この屈折率変化によりパルス光の位相は非線形成分を持つようになり、周波数幅が変化し、パルス波形が延びてしまう。この現象は自己位相変調と呼ばれ、この現象に起因して現時点で高いピーク強度を持つ超短パルスレーザー光はファイバ伝送できない。加えて、一般的にレーザー光はガウシアンプロファイルを有しビーム中心の強度が強いため、媒質中で空間的にも屈折率変化を持ってしまい、ビーム中心に向かって屈折率変化が増大する。この結果、自己収束が起こり、極端な例では照射エネルギーに応じて焦点方向において集光位置が変わる場合がある。

近年では、これら課題を解決した産業用超短パルスレーザーや光学素子が発売されており、煩雑なアライメントなしに、キースイッチ操作のみで超短パルスが得られるまでの完成度に仕上がっている。一般的な産業用超短パルスレーザーでは、得られた出力パルスに対して、光スイッチング素子を使用して必要な繰返し周波数に分周して間引きパルスを得る機能のほか、発振器が有する発振周波数にならない数発の超短パルストレインが得られるバースト機能、また、高調波発生機能を搭載するなど、機能面でも充実し始めている。以降、内部を構成する発振器や増幅器、機能に関して順次まとめていく。

2.2 発振器

最終的にレーザー発振器が出力するパルス幅は、一部技術¹¹⁾を除き、前述のCPAシステムを経ても発振器で得られるパルス幅よりも極端に短くなることはない。そのため、搭載している発振器によりシステム全体のパルス幅が決定されると言っても過言ではない。パルス幅を短くすることを念頭に置けば、発振源として、より短いパルス幅が得る必要がある一方、産業用途に耐えうるためには、長期的な安定性、装置大きさや価格、簡便性が重要であり、そのために様々な選択肢が設けられている。

そもそも超短パルスレーザー光の発生は、Qスイッチ法¹²⁾や一部例外はあるものの直接変調法¹³⁾のような一般的なレーザーパルス発生方法では不可能であり、モード同期法¹⁴⁾が最も多用されている。モード同期とは、外部もしくは自発的に発生する変調周期をレーザー共振器内の光周回時間と合わせることで、レーザーパルスが共振器内で特定の発振周波数で同期し、共振器外に出力される。よって、発振器の繰返し周波数は共振器長で決まり、以降の増幅を考慮すると発振器では、背景雑音を超えるある程度のパルスエネルギーを得る必要があるため、共振器長を長く設計する必要があるが生じる。

このモード同期を実現する選択肢として、レーザー媒質の形状、モード同期の方法や媒質が挙げられる。前述のように共振器長を長く設計する必要があるため、比較的共振器のアライメントは困難である場合が多い。この課題解決のため、レーザー媒質の形状を考えた際、ファイバレーザーは複雑なアライメントを必要とせず、高品位なビームが得られ、かつ、ファイバ内で利得が得ら

Fig. 1 Schematics of ultra-short pulse amplification.

れるため、小型かつ簡便な超短パルス発振器として注目されている。また、光ファイバによるソリトン動作や非線形偏波回転を活用し、安定かつ小型な構成で超短パルスを得る方法なども考案されているが、ファイバを用いるうえでの課題も存在し、ファイバ内部での伝送においてレーザー光のピーク強度が増すと非線形効果が強くなりパルス幅が延びてしまうため、得られるパルスエネルギーやピーク強度に制限があるという欠点もある。そのほかのレーザー媒質の形状としてはロッド型、最近注目されているディスク型が挙げられる。特にディスク型は排熱がロッド型に比べて容易で熱レンズ効果を低減できる利点はあるものの、利得媒質長が限られており、結局は古典的なロッド型も採用され続けており、三者三様の利点を有している。

加えて、最近では半導体レーザー駆動におけるバイアス電流の急激な変動に伴い誘起される過渡振動応答により、半導体レーザー共振器内で生じる緩和振動を利用して超短パルスを得る利得スイッチング法が実証されている¹⁵⁾。既存のモード同期ではパルス発生タイミングは共振器長で受動的に決まってしまう反面、この発振方式では、能動的にパルス発生タイミングを調整できる。発生パルス幅も10 psを切る超短パルス半導体レーザー発振器も報告されており¹³⁾、新たな超短パルスレーザー発振器の候補として期待されている。

次にモード同期の手法として、これまでのモード同期の古典的手法である光カー効果を利用したカーレンズモード同期¹⁶⁾にとって代わり、比較的安定にモード同期が可能な半導体可飽和吸収ミラー(Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM)をパルス発生誘因として使用してモード同期をかける場合が多くなっている¹⁷⁾。光カー効果とは、物質中に電場が印加された時に物質の屈折率が電場強度の二乗に比例して変化する現象で、この現象に起因するレーザー結晶の自己収束により加速的に光カー効果を強め、共振器内に設置されたスリットの透過量を調整してモード同期をかける。簡素な構成ながらフェムト秒領域でのモード同期が実現できる反面、Ti:sapphire結晶では発振波長が800 nm付近であるために分散補償プリズムを共振器内に配置する必要がある。また、吸収波長が可視領域にあることから、装置としては比較的大型になり、非常に敏感な共振器調整が必要となる。一方、SESAMをレーザー媒質とともに共振器内に設置し用いる場合、SESAMは予め設計された緩和時間に応じたパルス発生誘因となり、最終的にはカーレンズモード同期によりモード同期がかかる。超短パルス発生の側面だけを考えればレーザー結晶の自己モード同期の方が簡素な構成のため望ましいが、SESAMとYb系媒質やNd系媒質と組み合わせは比較的損傷しきい値が低い欠点はあるものの、安定なモード同期が得られ、かつ半導体レーザー励起が可能な点からも総合的にみて非常に簡素かつ堅牢な発振器になりえるため、最近では本構成が主流になっている。

Table 1 Comparison of lasing medium for generating ultra-short pulse.^{†1)}

	Nd:YAG	Ti:sapphire	Yb:YAG
Fluorescence Wavelength	1064 nm	660~1100 nm	1030 nm
Fluorescence Lifetime	~0.23 ms	0.0032 ms	0.96 ms
Fluorescence Spectrum	0.67 nm	440 nm	9.5 nm
Transform-limited pulse	2.5 ps	2.59 fs	165 fs
Absorption Wavelength	807.5 nm	488 nm	941 nm
Absorption Spectrum	1.5 nm	200 nm	21 nm
Quantum Efficiency	0.76	0.55	0.91

最後に、これまで比較したモード同期法の中でも言及した結晶の特性をTable 1にて比較する。前述のように、超短パルスレーザー光発生において最も可能性のある媒質はTi:sapphire結晶であることは間違いないが、吸収波長の課題があり、Nd系結晶は古くから完成された結晶のため高品位かつ安価に手に入れられる利点があるものの、物性値ではYb系結晶に多くの利点がある。Nd系結晶と比べると、蛍光スペクトル幅が長く、フーリエ限界パルス幅がフェムト秒領域まで短縮可能である。2002年には更なる広帯域波長可変性も報告されている¹⁸⁾。また、量子効率が高いことから高効率なレーザー発振が期待でき、現在ではYb系の超短パルスレーザーが増えて

2.3 増幅器

発振器より得られた超短パルスはFig. 1に示した流れに従い増幅器により増幅される。CPAおよびMOPA、いずれの増幅方式の場合でも発振器同様に、採用する媒質の特徴は同じである。レーザー媒質の形状において、増幅器ではスラブ型が加わる。スラブ型はディスク型よりも冷却効率が高く、高出力化に向けての有効なレーザー媒質形状である¹⁹⁾。ディスク型と比べてモードマッチング効率が劣るが、スラブ内をジグザグに導波させるジグザグスラブレーザーでは励起に伴う光学歪みを解消することができるなどの利点もある²⁰⁾。

それらレーザー媒質を用いて発振器から得られた超短パルスを増幅していくわけだが、増幅方式は固体レーザー媒質を用いる際には二つの方式に分かれる。一つがマルチパスアンプ方式、もう一つが再生増幅器方式になる。基本的にはレーザー媒質に対して光を複数回通過させて徐々にパルスエネルギーを増やしていくのだが、マルチパスアンプ方式では数枚のミラーを利用してパス回数を増やす。一方、再生増幅器では共振器構造を形成することでパス数を増やす。前者は発振器出力が安定な場

^{†1)} http://fuee.u-fukui.ac.jp/~optele/solid_index.htm

合、非常に安定なパルスを出力することができる反面、不安定なパルスの場合はその不安定性を重畳してしまう。後者の場合、共振器内で出力を飽和させるために発振器で多少不安定な出力でも、原理上、安定なパルスを得ることができる²¹⁾。しかしながらパルスを取り出すタイミング制御に対して十分に留意する必要がある。

最近では固体レーザー媒質以外にもファイバを用いた増幅が注目を集めており、その背景としてファイバ自体の取り回しの良さと光ファイバ特有の光ファイバラマン増幅が活用できることにある²²⁾。これは、光ファイバに対して強い励起光を入射させるとファイバ内にラマン散乱が生じ、これに基づく誘導放出が励起光波長より100 nm程度長い波長域にラマン利得波長帯を発生させる現象であり、元来この効率が低かったものの、最近の通信用光ファイバの開発の進展にもとない、高非線形かつ低損失な光ファイバが開発され、効率が向上している。前述にもあるが、光ファイバ内では自己位相変調によるパルス幅伸張が発生することから超短パルスの発生には限界があり、最終的にその発生にはパルス圧縮器を導入する必要がある。

2.4 機能

モード同期による超短パルスレーザーを発振源とした場合、共振器長で決まる基本発振周波数で発振しており、パルスを間引き増幅する。この発振器から増幅器に導入する際に複数のパルス列をまとめて増幅器に導入することで、Fig. 2に示す通り、超短パルスを短時間のうちにパルス列としてまとめて照射することができる。この機能はバースト機能と称され、加工レートの向上などの報告がなされている。加えて、増幅器でのゲインを調整して1パルス毎のピーク値を調整して自由に出力パルスを制御できる技術¹²⁾も開発されており、本技術による加工技術の発展が期待されている。

また、CPAを搭載したフェムト秒レーザー発振器では伸張器におけるチャープ量を制御することでパルス幅を変化させる機能を搭載している光源も製品化されている。

超短パルスレーザーでは多光子吸収により、加工対象に対して吸収を持たない波長であっても加工することが可能である。しかしながら、加工光学系の開口数を同等

Fig. 2 Schematics of burst pulse generation.

とした場合、波長が短いほど焦点深度が増すことから、材料に厚みがある場合に波長が短い方が良好な加工レートを得られる。超短パルスレーザーはパルス幅が短く、ナノ秒レーザー発振器と比べると1パルスあたりの $10^3 \sim 10^5$ 倍もピーク強度が高いため非線形光学結晶を用いた波長変換において高い変換効率を得ることができる。そのため、非線形光学結晶への集光スポット径を極端に絞り込む必要がなく、結晶の損傷が起きにくい。第二高調波あたりでは波長変換を経ても比較的パルスエネルギーが稼げるため、産業用超短パルスレーザー発振器においては比較的多用されている。

3. 産業用超短パルスレーザーの製品

現在、産業用超短パルスレーザーとして販売されている製品をTable 2にまとめる。各社とも出力水準の違いや高調波モデルなど多数製品化されているが、最も一般的なモデルや特徴的なモデルを抜粋して紹介する。これによると10年前では超短パルスレーザーとして主流であったTi:sapphire結晶を用いた光源よりも、より産業用途を意識したNd系結晶やYb系結晶を用いた光源が増えていることが分かる。

4. 産業用超短パルスレーザーの展望

産業応用への適用を阻害していたレーザー発振器の不安定は解消され、理化学用途に限られていたような超短パルスレーザーがターンキーのみですぐに動作する時代が来ており、その多くの製品が市場に投入されていることから、産業用超短パルスレーザーは今、まさに黎明期である。既に安定に動作することは当たり前で、各社とも独自の特徴を持った光源を次々に製品化している。今後の展望としては、安定性のほかに産業応用への適用を阻害している生産性向上につながる高出力化、廉価化、および、更なる超短パルス化にあると考える。

高出力化に関しては、パルスエネルギーの向上もしくは高繰返し化になるが、前者に関して、高いパルスエネルギーの発生は高いピーク強度を有するためレーザー発振器内部への負担がかかる点と、加工に適用する際には自己位相変調による集光特性の変化や集光点における空気の電離から生じるエアブレイクダウンによるエネルギー散逸を考慮して適用しなければならない。また、後者に関して、発振周波数の高繰返しに対応して、高速かつ高精度に光走査が実現できる光走査デバイスが必要となる。近年、位置決め精度が向上したデジタルガルバノスキャナ、比較的大面積を1軸方向に対して高速に光走査できるレーザー加工用ポリゴンミラーが製品化されていること¹³⁾は偶然の一致ではないと考えられる。

次に廉価化に関して、これだけの製品が市場に投入されていることから市場競争原理が働き、非常に高価で

¹²⁾ http://www.time-bandwidth.com/upload/press/flexburst_technology_details.pdf

¹³⁾ http://nextscantecnolog.com/wp-content/uploads/2013/05/LSE170A_NS_LR.pdf

Table 2 Summary table of Industrial ultra-short pulse lasers.

Company	Model	Wavelength	Power	Pulsewidth
Active Fiber Lasers	Pro-Series	1030 nm	< 50 W (50 kHz to 1 MHz)	< 10 ps
Amphos	Amphos 400 ps	1030 nm	400 W (1 MHz to 80 MHz)	< 10 ps
	Amphos 400 flex	1030 nm	400 W (1 MHz to 27 MHz)	500 fs to 5 ps
Amplitude System	Satsuma HP2	1030 nm	20 W (0 to 2 MHz)	< 400 fs
	s-Pulse HP2	1030 nm	> 8 W (0 to 300 kHz)	< 500 fs
Attodyne	APL-X	1064 nm	10 W (0 to 1 MHz)	< 10 ps
	APLQ	1064 nm	1 W (0 to 1 kHz)	< 10 ps
Clark MXR	IMPULSE	1030 nm	20 W (200 kHz to 25 MHz)	< 250 fs to > 8 ps
Coherent	Talisker HE 1064-10	1064 nm	10 W @ 50 kHz	< 15 ps
	Super Rapid 50-1064	1064 nm	50 W (400 kHz to 1 MHz)	< 15 ps
Corelase	X-LASE 24-6	1060 nm	24 W (1 to 4 MHz)	10 to 30 ps
Cyber Laser	Ifrit	800 nm	1 W (0 to 1 kHz or 2 kHz)	< 250 fs
	Ifrit-TD20	1030 nm	20 W (50 to 200 kHz)	< 3 ps
edgewave	PXxxx-1	1064 nm	400 W (20 MHz)	10 ps
EKSPLA	Atlantic 1064	1064 nm	> 16 W (1 Hz to 500 kHz)	< 10 ps
Fianium	HYLASE-25	1064 nm	> 25 W (0.1 to 1 MHz)	< 25 ps
Hamamatsu Photonics	MOIL-ps	1030 nm	4W (1 to 200 kHz)	1.5 to 10 ps
IPG photonics	YLPS-20	1040 nm	20 W (10 to 700 kHz)	< 70 ps
IMRA	μJewel D-10 K	1041 nm	> 10 W (1 MHz)	< 800 fs
Kataoka	KLY-PSAB 10/25/0.5 A	1064 nm	10 W (100 kHz to 800 kHz)	< 25 ps
Lee Laser	Version 2	1064 nm	10 W (100 kHz to 6 MHz)	15 ps
Light conversion	PHAROS SP	1030 nm	6 W (1 Hz to 200 kHz)	190 fs to 10 ps
	PHAROS LP	1030 nm	18 W (1 Hz to 600 kHz)	10 ps
onefive	Katana-10 HP	1064 nm	20 W (25 kHz to 100 MHz)	< 20 ps to 1 ns
Photon Energy	CEPHEUS 1012	1064 nm	12 W (1 Hz to 500 kHz)	< 15 ps
Photonics Industries	RGH-1064-60	1064 nm	60 W (1 MHz)	< 15 ps
PolarOnyx	Uranus	1030 nm etc.	10 W (110 MHz)	< 800 fs
Quantronix	Integra-HE.E	800 nm	7 W (1-2 kHz)	70 to 130 fs
Raydiance	R-200	1552 nm	10 W (60 kHz to 1 MHz)	800 fs
Spectra Physics	Spirit 1040-8	1040 nm	8 W (1 Hz to 1 MHz)	< 400 fs
	Spirit ps 1040-10	1040 nm	> 10 W (1 Hz to 1 MHz)	13 ps
Spectronix	LYF-P0500	1064 nm	10 W (200 kHz to 1 MHz)	11 ps
Time-bandwidth Products	PicoBlade	1064 nm	50 W (0 to 8.2 MHz)	10 ps
Trumpf	TruMicro 5080	1030 nm	150 W (800 kHz)	< 10 ps
	TruMicro 5050 Femto	1030 nm	40 W (200 to 800 kHz)	800 fs

あった超短パルスレーザー発振器の値段は下落傾向にある。さらにもう一つの背景として、これまで比較的数量が限られていた超短パルスレーザー用のレーザー部品の製品安定性が高まり、また、数量が増えることで、部品レベルで廉価化が進んだことが推測される。今後更なる産業応用への投入が進むことにより、この傾向は加速していくものと考えられる。

最後に、近年の新しい材料やデバイス製造にまつわる高い要求加工目標はとどまるところを知らない。それに応えるべく、加工工法の一つとして、超短パルスレーザー光による物質加工が冷却水などの媒体を使用せず

に、非接触、非熱的、かつ精密に物質の除去を可能にし、現在主流の機械加工で実現しえなかった加工を具現化させる可能性は大いにある。その実現のため、究極を求めれば更なる短パルス化によるピーク強度の向上、それはまさに光で分子間結合を切断する機械加工を超越した次世代の加工技術への進展に広がる。しかしながらその実現に対し、前述のとおり超短パルスレーザー光は広帯域性を有している点や様々な非線形性を有していることから、極端に扱いが難しくなる。10年程度前は理科学用に限られていた超短パルスレーザー発振器が、現在、これほどに産業応用に開発されていることを鑑みれば、

光学素子に代表される周辺技術の進展も歩を合わせ、さらなる超短パルスによる新しい加工方法も実現される日が訪れることが期待される。

5. まとめ

本稿において産業用超短パルスレーザーの構成や製品に関する現状、および将来展望について解説を行った。

現時点でも新しい製品が次々に投入されている状況からも今後ますますの発展が期待され、本稿を通じて超短パルスレーザーへの理解が深まり、その産業応用への一助になれば幸いである。

謝 辞

本稿執筆にあたり、超短パルスレーザー発振器販売元に製品仕様等の最新資料の提供を受けた。この場を借りてお礼申し上げたい。また、筆者調査不足により未掲載の情報もあることも予想され、関係者の方々にはご容赦願いたい。

参考文献

- 1) T. S. Rose, M. J. Rosker, and A. H. Zewail: J. Chem. Phys. **91** (1989) 7515.
- 2) Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch: Nature **416** (2002) 233.
- 3) M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz: Nature **414** (2001) 509.
- 4) 小原 實, 神成 文彦, 佐藤 俊一: レーザ応用光学 (共立出版, 1998) p.252.
- 5) 小原 實: 精密工学会誌 **72** (2006) 943.
- 6) W. Koechner, R. Burnham, J. Kasinski, P. Bournes, D. DiBiase, K. Le, L. Marshall, and A. Hays: Proc. Int'l Conf. Optical Space Com. (Munich, 10-14 June 1991), ed. J. Franz. Proc. SPIE **1522** (1991) 169.
- 7) E. Treacy: IEEE J. QE-5 (1969) 454.
- 8) O. E. Martinez: IEEE J. QE-23 (1987) 59.
- 9) D. Strickland and G. Mourou: Opt. Commun. **56** (1985) 219.
- 10) 長谷川 智士: 光学 **41** (2012) 385.
- 11) Y. Matsui, M. D. Pelusi, and A. Suzuki: IEEE Photon Tech Lett. **11** (1999) 1217.
- 12) W. G. Wager and B. A. Lengyel: J. Appl. Phys. **34** (1963) 2040.
- 13) S. Chen, A. Sato, T. Ito, M. Yoshita, H. Akiyama, and H. Yokoyama: Opt. Express **20** (2012) 24843.
- 14) E. P. Ippen, C. V. Shank, and A. Dienes: Appl. Phys. Lett. **21** (1972) 348.
- 15) P. L. Liu, C. Lin, I. P. Kaminow, and J. J. Hsieh: IEEE J. QE-17 (1981) 671.
- 16) D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett: Opt. Lett. **16** (1991) 42.
- 17) U. Keller, W. H. Knox, and H. Roskos: Opt. Lett. **15** (1990) 1377.
- 18) J. Saikawa, S. Kurimura, I. Shoji, and T. Taira: Opt. Mat. **19** (2002) 169.
- 19) W. Koechner: Solid-state Laser Engineering (Optical sciences, Springer) p.447.
- 20) 川戸 栄, 末田 敬一, 小林 喬郎: レーザー研究 **33** (2005) 1.
- 21) W. Koechner: Solid-state Laser Engineering (Optical sciences, Springer) p.563.
- 22) F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, and A. Carnera: Phys. Rev. B **57** (1998) 444.