レーザーオリジナル

全固体Cr:LiSAFレーザーによる44フェムト秒パルスの発生

青島 紳一郎*・伊藤 晴康*・黒柳 和良*・土屋 裕*

(1995年9月8日 受理)

44 fs Pulse Generation from an All-Solid-State Cr:LiSAF Laser

Shin-ichiro AOSHIMA*, Haruyasu ITOH*,
Kazuyoshi KUROYANAGI* and Yutaka TSUCHIYA*

(Received September 8, 1995)

We have developed an all-solid-state femtosecond Cr:LiSAF laser that produces 44 fs pulses at an 87.6 MHz repetition rate with a 2.2 mW average power. The spectral width is 22.4 nm and the peak wavelength is 906 nm. The time bandwidth product of 0.36 is obtained by assuming a sech^2 waveform.

Key Words: Femtosecond laser, All-solid-state laser, Diode pumped laser, Cr:LiSAF, Kerr-lens modelocking

1. はじめに

フェムト秒レーザーの代表例であるチタンサファイアレーザーは、吸収波長域が600 nmより短波長側にあるため、一般的には励起光源として Ar^+ レーザーが必要になる。この Ar^+ レーザーは大型であるとともに、高圧電源、冷却水が必要であるので、レーザーの導入に際して、環境設備を整備しなければならないという大きな問題がある。この問題を回避するために、半導体レーザー (Laser Diode; LD) 励起YLFレーザーの共振器内で変換したSHG (Second Harmonic Generation) 光で励起したチタン・サファイアレーザーで、110 fsの光パルスを発生した例がある¹⁾が、構成が複雑である。このような背景から、使い勝手の良い小型の全固体フェムト秒レーザーが強く望まれている。

このため、LDで直接励起が可能なCr:LiSAF ($\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$) が注目を集め、最近では主に海外で盛んに研究がおこなわれている。昨年、Mellishらによって初めてLD励起フェムト秒Cr:LiSAFレーザーが実現され、220 fsの光パルスが得られた²⁾。ここでは、MQW (Multiple Quantum Well) アブソーバーを共振器内に用いた受動モード同期がおこなわれた。LD励起フェムト秒Cr:LiSAFレーザーは、その後同様の方法を用いて他でも実現された³⁾が、Dymottらは、カーレンズモード同期によってフェムト秒パルスを発生することを試み^{4,5)}、最近、18 fsのパルス発生に成功した⁶⁾。

他方、我々も、Cr:LiSAFレーザーに早くから着目し⁷⁾、カーレンズモード同期による全固体フェムト秒レーザーの実現を目標として

* 浜松ホトニクス株式会社中央研究所 (〒434 浜北市平口5000)

* Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K. (5000 Hirakuchi, Hamakita, Shizuoka 434)

種々の研究を行ってきた⁸⁻¹²⁾。予備実験として Ar^+ レーザー励起による 64 fs パルスの発生⁸⁻¹⁰⁾をおこない、その後、半導体レーザー励起により 109 fs のフェムト秒光パルスを発生した^{11,12)}。しかし、半導体レーザー励起によるモード同期発振は不安定な状態であった。

そして最近、安定な 44 fs (FWHM) の光パルスの発生に成功した。このレーザーは、Dymottらのレーザーと比較すると、まだパルス幅は長い⁸⁾が、構成が簡単になっている。つまり、彼らはX型共振器でレーザー結晶を両側から励起しているのに対し、我々はZ型共振器で一方から励起した。また、我々のレーザーでは、共振器内にAO (Acousto-Optic) 変調器を配置していない。

本報告は、Cr:LiSAFレーザーによるフェムト秒パルスの発生に焦点を絞って、我々が研究した各種方式のレーザーの特性を比較検討しながら、最近開発した 44 fs のパルスを発生する全固体フェムト秒Cr:LiSAFレーザーについて報告する。

2. フェムト秒レーザーの構成

最初に、励起光源に Ar^+ レーザーを用いてフェムト秒光パルスの発生を試み、カーレンズモード同期によりパルス幅 64 fs の光パルスを得た⁸⁻¹⁰⁾。Fig. 1はその時のレーザーの構成を示す。Cr:LiSAF結晶の長さは 23 mm である。分散補償用のプリズム対はSF10を用い、プリズムの間隔が 26 cm の時にパルス幅は最も短くなった。この時の帯域幅パルス幅積 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ は 0.32 であり、パルス波形を sech^2 とした時の理想的な値である 0.315 にほとんど一致し、ほぼトランスフォーム限界のフェムト秒光パルスが得られていることがわかった。

次に、半導体レーザー励起によるフェムト秒光パルスの発生を試みた。Fig. 2はその構成を示す。この構成では、波長約 670 nm と約 690 nm のLDをそれぞれ2個ずつ用いて、ダイクロイックミラーと偏光ビームスプリッターを利用して4本のLDビームを合成し、レーザー結晶の

Fig. 1 Schematic of femtosecond Cr:LiSAF laser pumped with an Ar^+ laser.

Fig. 2 Schematic of all-solid-state femtosecond Cr:LiSAF laser using a mirror coated on a crystal facet as a resonator.

直前で最大 2 W の励起光強度を得た。

ところが、Cr:LiSAFレーザーの出力が飽和するという問題が生じた。我々は、レーザー媒質が吸収した光のうち、励起に寄与しない光の熱放射でレーザー結晶内の熱的分布が生じ、レーザー光の光軸を変化させて出力が飽和すると考えた。そこで、レーザー結晶内の熱的分布を緩和させるために、レーザー結晶を 15 °C に冷却した。その結果、発振しきい値が低減すると同時に、1.2 W までの励起光強度の励起光を入射できるようになったので、この条件下で実験をおこなった。この時、Fig. 2 の 689 nm の LD は用いなかった。

結晶の長さは 10 mm であり、結晶の端面に施したコーティング面を共振器鏡として用いた。また、対向する励起光入射側の端面は反射防止コーティングを施すと共に、2° の傾きをもたせた。

レーザー結晶の長さが10 mmと短く、分散も小さいために、分散補償用のプリズム対として合成石英を用いた。このときのプリズムの間隔は67 cmであった。この構成により繰り返し139 MHz、出力光強度2.7 mW、パルス幅109 fsの光パルスを得ることができた^{11,12)}。また、その時の $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ は0.38であった。しかし、モード同期の持続時間は数十秒程度であり、モード同期発振は不安定であった。

チタン・サファイアレーザーのカーレンズレンズモード同期では、レーザー媒質をレーザー共振器の中央に配置した対称型のレーザーの方が安定になることが報告されている¹³⁾。我々は、このレーザーの不安定な状態がレーザー共振器の非対称型の構成にあるのではないかと考え、レーザー媒質をレーザー共振器の中央に配置することを試みた。

Fig. 3は最近開発したレーザーの構成を示す。Ar⁺レーザー励起の場合と同様なZ型の共振器とし、1個のLDで励起することにした。結晶の長さは8 mmである。レーザー発振のしきい値を下げるために、温度を 17 ± 0.1 °Cに制御して実験した。また、モード同期を安定化するために共振器内にスリットを配置した。この構成で、さまざまな半導体レーザーや結晶を試した結果、安定なモード同期をかけることに成功した。この時、44 fsの光パルスが得られ、 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ は0.36であった。

モード同期はスピーカーに取り付けられた出力鏡を200 μ m程度振動させることにより始

Fig. 3 All-solid-state femtosecond Cr:LiSAF laser using a Z-folded cavity producing 44 fs pulses.

動し、モード同期がかかった時点でスピーカーの振動を停止する。通常の実験室程度の環境で1時間程度、安定なモード同期が持続する。再度モード同期をかける際には、スピーカーを振動させながら出力鏡のあおりを調整した。励起光の短時間での強度変動は、 $\pm 0.4\%$ peak to peak以下と非常に安定しており、また、1時間程度では励起光強度に大きな変化はない。レーザー共振器内の空気の対流に伴うレーザービームのふらつきを低減するため、レーザーの周りを囲うような対策によってモード同期の持続時間を長くすることができると考えられる。

3. パルス幅の測定

パルス幅の測定は、SHG自己相関波形測定装置で行った。Fig. 4は、SHG自己相関波形測定装置の構成を示す。SHG自己相関波形測定装置は、被測定光の分岐にビームスプリッターを用い、SHG結晶への集光にレンズを用いるのが一般的である。しかし、被測定フェムト秒パルスが分散媒質であるそれらの光学素子を通過する際に、パルス波形が変形することが懸念される。そこで、我々は、分散のほとんどないアルミの反射鏡を用いて分岐および集光を行い、分散の影響を極力回避してパルス幅を測定

Fig. 4 SHG autocorrelator using an Al reflection mirror for splitting and focusing a laser beam to eliminate the effect of group velocity dispersion.

した。

図中のセンサーは、コーナリフレクターとのギャップの距離を電圧信号に変換する。この信号をデジタルストレージオシロスコプのチャンネル1に入力し、SHG光を受光した光電子増倍管(PMT)の出力信号をチャンネル2に入力し、同時に記録する。用いたオシロスコプは、X-Y入力とした時、観測は可能であるがデータを取り込めないでこのようにして実験した。別途求めたセンサーの校正データを利用して、コーナリフレクターの移動距離すなわち遅延時間を校正して、自己相関波形を求めた。なお、SHG結晶には厚さ1.2 mmのLIO(LiIO_3)結晶を用いた。

4. フェムト秒パルスの諸特性

これまで述べてきた3種類のレーザーで得られた光パルスの測定結果をFig. 5にまとめて示す。(a)は Ar^+ レーザー励起レーザー、(b)は結晶端面を共振器として利用したLD励起レーザー、(c)は最近開発したZ型共振器のLD励起レーザーからの光パルスの測定結果を示す。それぞれ、左側にSHG自己相関波形、右側にスペクトル波形を示す。

SHG自己相関波形では、パルス波形を sech^2 と仮定した時の理論曲線を実線で示し、得られたデータをドットで示した。各図の右上部にSHG自己相関測定波形から求めた光パルス幅 $\Delta\tau$ の値を示した。一連の図では、比較しやすいように横軸の遅延時間を揃えてあるので、時間分解能を上げて測定した(c)では、最大遅延量が小さく、ドット密度が高くなっている。

それぞれの右側に示したスペクトル波形のデータには、各図の右上部にピーク波長、スペクトル幅および周波数幅の値を示した。また、左右の図の中央上部に $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ の値を示した。

これらを比較すると、最近開発したZ型共振器のLD励起レーザーで最も短い44 fsの光パルスが得られていることがわかる。スペクトル波形からわかるように、ピーク波長は906 nm、

スペクトル幅は22.4 nmである。他の図と比較すると、スペクトルが35 nm程度長波長側にシフトし、小さな微細構造が重畳されていることがわかる。しかし、現在のところ、これらの原因は明らかでない。また、 $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ を比較すると、今回開発したフェムト秒レーザー(図(c))は、他の両者の中間の値になっている。この値はフーリエ限界より大きな値であり、今後さらに短パルス化できる可能性がある。

Fig. 6は、今回開発した44 fsのレーザーの構成において、励起光強度に対する出力光強度を測定した結果である。このデータはCW発振状態で測定した。最大励起光強度430 mWに対して出力光強度2.2 mWが得られた。この間にレーザー出力の飽和はなく、発振しきい値は80 mWであった。また、モード同期状態での最大励起光強度430 mWに対する出力光強度は、CW発振時と同じ2.2 mWであった。この状態から、励起光強度を徐々に小さくしていき、モード同期がcaからなくなった時の励起光強度は360 mWであった。Fig. 6には、モード同期のしきい値としてその点を矢印で示した。また、この図から求まるスロープ効率は0.6%であった。

最大出力光強度およびスロープ効率が小さいのは、モード同期のしきい値を小さくするために、高反射率の出力鏡を用いて共振器内の光強度をできる限り大きくしていることに起因している。励起光強度を大きくするなどして透過率の大きい出力鏡を用いることができれば、スロープ効率および最大出力光強度はともに大きく改善できると思われる。

Fig. 7は44 fsの光パルスの空間モードを測定した結果を三次元表示したものである。このような測定から、Cr:LiSAFレーザー出力光は、ガウス状の強度分布をしており、ピークの $1/e^2$ で定義されるビーム直径は1.5 mmであることがわかった。

Fig. 5 Characteristics of femtosecond pulses; (a) Ar^+ laser pumped laser (b) all-solid-state laser and (c) all-solid-state Z-folded cavity laser. The autocorrelation traces and the spectrum are shown in the left and the right side, respectively.

Fig. 6 Output power versus pump power.

Fig. 7 Intensity profile of 44 fs pulses, showing a beam diameter of 1.5 mm at $1/e^2$.

5. まとめ

半導体レーザー励起による全固体フェムト秒レーザーを実現した。得られたパルス幅は 44 fs (FWHM), ピーク波長は 906 nm, スペクトル幅は 22.4 nm (FWHM), 平均出力は 2.2 mW である。また, これらの値から計算される $\Delta\nu \cdot \Delta\tau$ は 0.36 であった。

今後は, ミラー, 励起光, 結晶等を再度検討してしきい値の低減化を図ると同時に, レーザー全体を一つの筐体に収納し, 外乱の影響を低減するなどして, モード同期を安定させる予

定である。また, 共振器内に波長選択素子を挿入して波長可変制御を行い, 全固体波長可変フェムト秒レーザーとするべく研究を推進したい。

謝辞

実験の初期の段階で, ミラーの設計, 製作をして下さった大林 寧氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) K. Lamb, D. E. Spence, J. Hong, C. Yelland and W. Sibbett: Opt. Letters 19 (1994) 1864.
- 2) P. M. Mellish, P. M. W. French, J. R. Taylor, P. J. Delfyett and L. T. Florez: Electron. Letters 30 (1994) 223.
- 3) D. Kopf, K. J. Weingarten, L. R. Brovelli, M. Kamp and U. Keller: Opt. Letters 19 (1994) 2143.
- 4) M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson: Opt. Letters 19 (1994) 1988.
- 5) M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson: Opt. Letters 20 (1995) 1157.
- 6) M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson: Tech. Digest on CLEO '95, CWM1 (1995) 251.
- 7) 青島紳一郎, 伊藤晴康, 大林 寧, 平野伊助: レーザー学会第12回年次大会予稿集, 12pII5 (1992) 50.
- 8) 伊藤晴康, 黒柳和良, 瀧口義浩, 大林 寧, 青島紳一郎: レーザー学会第14回年次大会予稿集, 20aIII12 (1994) 46.
- 9) 青島紳一郎, 伊藤晴康, 黒柳和良, 大林 寧, 土屋 裕: レーザー学会研究会資料, RTM-94-23 (1994) 7.
- 10) S. Aoshima, H. Itoh, K. Kuroyanagi, Y. Takiguchi, Y. Ohbayashi, I. Hirano and Y. Tsuchiya: IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement 44 (1995) in press.
- 11) H. Itoh, S. Aoshima, K. Kuroyanagi, Y. Ohbayashi and Y. Tsuchiya: Technical Abstracts of International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, Feb. (1995) 39.
- 12) 伊藤晴康, 青島紳一郎, 大林 寧, 土屋 裕: 第56回応用物理学会学術講演会予稿集, 27pP4 (1995) 860.
- 13) G. Cerullo, S. De. Silvestri and V. Magni: Opt. Letters 19 (1994) 1040.