

## 可視波長可変レーザー

青島紳一郎・伊藤 晴康・黒柳 和良

1960年にMaimanが初めてレーザー発振に成功したのは固体レーザーであるルビー( $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )レーザーであった<sup>1)</sup>。この後、遷移金属や希土類元素を活性媒質とした数多くの固体レーザーが開発されてきた。近年になって、チタンサファイア( $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )レーザー<sup>2-7)</sup>が、色素レーザーにとってかわってよく利用されるようになってきた<sup>3)</sup>。その理由は、液体の色素レーザーと比較すると高安定であり、また、劣化が少ないので定期的なレーザー媒質の交換が不要で、広帯域波長可変制御、高出力であるからである。

このようなレーザーの固体化の傾向のなかで、既存の半導体レーザー(laser diode: LD)で励起が可能な固体レーザー媒質が開発され、Cr:LiSAF( $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrAlF}_6$ )レーザー<sup>8-24)</sup>などで使い勝手のよい全固体波長可変固体レーザーが実現されつつある。

本稿では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 程度までの可視から近赤外域の波長可変固体レーザーについて分類、整理してその発振波長域などを述べ、代表的な波長可変固体レーザーの研究動向について報告し、筆者らが研究を行っている全固体Cr:LiSAFレーザーについて述べる。広帯域レーザーは、超短パルスレーザーの可能性を有するので、その観点からも報告する。

### 1. 波長可変レーザー結晶

波長可変レーザー結晶は、ホスト材料とドープイオンとで分類できる。ホスト材料には、材料の構成(酸化物

結晶、フッ化物結晶)、結晶構造(晶族)等がある。しかし、蛍光スペクトルは、主としてホスト材料に混入されるドープイオンによって決定されるので、ここではドープイオンによる分類をした。

$1.5\ \mu\text{m}$ 程度までの可視から近赤外域の波長可変レーザー結晶をドープイオンにより分類すると $\text{Ti}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{4+}$ 、 $\text{V}^{2+}$ などがある。これらのイオンをドープした $100\ \text{nm}$ 以上の波長可変範囲のレーザー結晶を中心にして、その発振波長域をまとめて表1に示す。これ以外にも色中心レーザーがあるが、ここでは触れない。以下にドープイオンごとに、発振波長域、励起光源等について簡単に述べ、次節以降で代表的な波長可変レーザーについてより詳しく述べる。

#### 1.1 $\text{Ti}^{3+}$ ドープ結晶

固体レーザーの代表であるチタンサファイアレーザーがある<sup>2-7)</sup>。波長帯域が $680\sim 1100\ \text{nm}$ と最も広く、波長可変レーザー、フェムト秒レーザーとして広く利用されている。通常アルゴンレーザーで励起する。最近、 $5\ \text{W}$ 級の全固体緑色レーザーが市販され<sup>25)</sup>、これを励起光源に利用すれば容易に全固体フェムト秒チタンサファイアレーザーが実現できると思われる。

#### 1.2 $\text{Cr}^{4+}$ ドープ結晶

$\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ (クロムフォルステライト)<sup>26-30)</sup>、 $\text{Cr}^{4+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{Cr}:\text{YAG})$ <sup>31-33)</sup>、 $\text{Cr}^{4+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5(\text{Cr}:\text{YSO})$ <sup>34)</sup>などがあり、 $1.2\ \mu\text{m}$ 付近で発振する。 $500\ \text{nm}$ 付近に大きな吸収帯が存在し、また、 $1.1\ \mu\text{m}$ 程度まで吸収帯が存在するため、Nd:YAGレーザーの基本波、その2倍波、クリプトンレーザー、チタンサファイアレーザーなど、種々のレーザーによる励起が行われている。これらのうち、最初にレーザー発振が報告されたのは、クロムフォ

Visible tunable lasers (1996年5月8日受理)  
Shin-ichiro AOSHIMA, Haruyasu ITOH, Kazuyoshi KUROYANAGI 浜松トニクス(株)中央研究所(〒434 浜北市平口5000)

表1 ドープイオンで分類した波長可変レーザー結晶とその発振波長域。

| ドープイオン           | ホスト結晶   | 通称                 | 発振波長 (nm) | 文献         |
|------------------|---|--------------------|-----------|------------|
| Ti <sup>3+</sup> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | チタンサファイア           | 680-1100  | 2-7)       |
| Cr <sup>4+</sup> | Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                                      | クロムフォルステライト        | 1167-1345 | 26-30)     |
|                  | Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>                        | Cr:YAG             | 1320-1530 | 31-33)     |
|                  | Y <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>                                       | Cr:YSO             | 1170-1290 | 34)        |
| Cr <sup>3+</sup> | BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                      | アレキサンドライト          | 700-818   | 35-37)     |
|                  | Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub>      | エメラルド              | 720-842   | 38)        |
|                  | LiSrAlF <sub>6</sub>  | Cr:LiSAF           | 780-1010  | 8-24)      |
|                  | LiCaAlF <sub>6</sub>  | Cr:LiCAF           | 720-840   | 9, 39, 40) |
|                  | LiSr <sub>0.8</sub> Ca <sub>0.2</sub> AlF <sub>6</sub>                | Cr:LiSCAF          | 750-950   | 41)        |
|                  | LiSrGaF <sub>6</sub>  | Cr:LiSGAF          | 810-855   | 42-44)     |
|                  | Gd <sub>3</sub> (Ga, Sc) <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | Cr:GSGG            | 742-842   | 38, 45)    |
|                  | La <sub>3</sub> Ga <sub>5</sub> SiO <sub>14</sub>                     | Cr:LGS             | 862-1107  | 46)        |
|                  | Na <sub>3</sub> Ga <sub>2</sub> Li <sub>3</sub> F <sub>12</sub>       | Cr:GFG             | 741-841   | 47)        |
|                  | ScBO <sub>3</sub>   |                    | 787-892   | 38, 48)    |
|                  | SrAlF <sub>5</sub>  |                    | 852-947   | 38, 49)    |
|                  | ZnWO <sub>4</sub>   |                    | 980-1090  | 50)        |
|                  | V <sup>2+</sup>   | CsCaF <sub>3</sub> |           | 1240-1330  |
| MgF <sub>2</sub> |   |                    | 1060-1160 | 52)        |

ルステライトレーザーであり<sup>26)</sup>、当初は Cr<sup>3+</sup> による発振であると考えられていたが、現在では、Cr<sup>4+</sup> による発振であることが知られている<sup>27)</sup>。

### 1.3 Cr<sup>3+</sup> ドープ結晶

波長可変レーザー結晶の種類は最も多く、アレキサンドライト (Cr<sup>3+</sup>:BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sup>35-37)</sup>、エメラルド (Cr<sup>3+</sup>:Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>)<sup>38)</sup>、Cr:LiSAF (Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub>)<sup>8-24)</sup>、Cr:LiCAF (Cr<sup>3+</sup>:LiCaAlF<sub>6</sub>)<sup>9, 39, 40)</sup>、Cr:LiSCAF (Cr<sup>3+</sup>:LiSr<sub>0.8</sub>Ca<sub>0.2</sub>AlF<sub>6</sub>)<sup>41)</sup>、Cr:LiSGAF (Cr<sup>3+</sup>:LiSrGaF<sub>6</sub>)<sup>42-44)</sup>、Cr:GSGG (Cr<sup>3+</sup>:Gd<sub>3</sub>(Ga, Sc)<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>)<sup>38, 45)</sup>、Cr:LGS (Cr<sup>3+</sup>:La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>)<sup>46)</sup>、Cr:GFG (Cr<sup>3+</sup>:Na<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>Li<sub>3</sub>F<sub>12</sub>)<sup>47)</sup>、Cr<sup>3+</sup>:ScBO<sub>3</sub><sup>38, 48)</sup>、Cr<sup>3+</sup>:SrAlF<sub>5</sub><sup>38, 49)</sup>、Cr<sup>3+</sup>:ZnWO<sub>4</sub><sup>50)</sup> などがある。ルビー (Cr<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) レーザーもここに属するが、波長可変制御はできない。

これらのレーザー結晶は、900 nm 付近の近赤外域で発振する。Cr<sup>3+</sup> の吸収帯は 450 nm 付近と 650 nm 付近に存在するため、アルゴンレーザー、クリプトンレーザー等さまざまなレーザーで励起が行われている。アレキサンドライト、Cr:LiSAF、Cr:LiCAF、Cr:LiSGAF

では、いずれも、既存の LD による励起が可能である。

### 1.4 V<sup>2+</sup> ドープ結晶

V<sup>2+</sup>:CsCaF<sub>3</sub><sup>51)</sup>、V<sup>2+</sup>:MgF<sub>2</sub><sup>52)</sup> などがある。1.1 μm 付近で発振する。励起にはクリプトンレーザーや Nd:YAG レーザーが用いられる。

### 1.5 その他

以上の他に Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(Yb:YAG)<sup>53, 54)</sup> などがある。Yb:YAG レーザーは、1.03 μm あるいは 1.05 μm 付近で発振し、940 nm 帯に吸収のピークがある。LD 励起レーザー<sup>53)</sup>、チタンサファイアレーザー励起によるサブピコ秒パルスの発生<sup>54)</sup> などが報告されている。

## 2. チタンサファイアレーザー<sup>2-7)</sup>

チタンサファイアレーザーは、フェムト秒レーザーが市販され、フェムト秒光源として現在最も広く用いられている。レーザー共振器内の高強度の光によりレーザー媒質自体の屈折率が変化し、自己ビーム収束が生じて横モードが時間的に変化するカーレンズモード同期は、チタンサファイアレーザーで初めて行われた<sup>4)</sup>。

図1に、フェムト秒チタンサファイアレーザーの基本

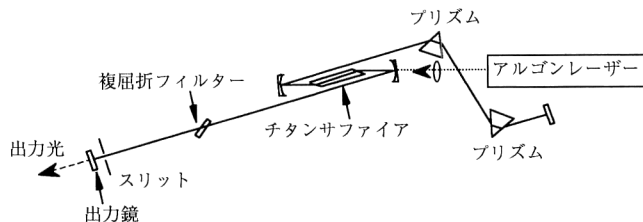


図1 フェムト秒チタンサファイアレーザーの基本的な構成。

的な構成を示す。共振器内に位相分散補償用プリズム対を配置している。市販のレーザーの場合、全反射鏡で折り返して、小型化されている場合が多い。また、共振器内に配置したガラス板を振動させるなどの変動を与えてモード同期を始動し、最終的には変動を停止してカーレンズモード同期によってフェムト秒パルスを得る。複屈折フィルターなどで波長可変制御できる。

当初はレーザー媒質が長く分散によるパルス広がりが見えなかったために、色素レーザー以下のパルス幅を得ることは困難であると考えられていた。これに対し、 $Ti^{3+}$  のドープ量を増加させるとともにレーザー媒質長を短くし、さらにプリズム対に低分散の材質を用いて高次の分散を抑えることにより、20 fs 以下の超短光パルスの発生がなされた。さらに、レーザー共振器から出力光を取り出す位置によりパルス幅およびチャープ量が異なることを利用し、プリズム対とレーザー媒質の間に挿入したペリクルからの反射光を出力光として取り出し、これを厚さ 1 mm の石英を透過させることで、パルス幅 8.5 fs の超短光パルス列が得られた<sup>5)</sup>。

また、最近、単純なレーザーの構成でフェムト秒光パルスを得た報告がある<sup>6)</sup>。片面に誘電体多層膜鏡が施されたフラット/プリュースター面のレーザー媒質を用いて、カーレンズモード同期した。従来のプリュースタープリズムを等分し、端面に誘電体多層膜鏡を施したいわゆるプリズムミラーを用いている。このようにして、レーザー媒質とプリズムとで位相分散補償用プリズム対の役割をさせている。プリズムに LAKL 21 を用いたとき、54 fs の光パルスが、385 MHz の繰返しで得られた。このとき、3.5 W の励起で 120 mW の出力光強度を得ている。また、プリズムを SF 10 とし、励起光強度を 5.2 W としたとき、パルス幅 111 fs、1 GHz、430 mW の出力光が得られている。

その他、チタンサファイアをファイバー状に成長させ、これを Nd:YAG の 2 倍波で励起することにより、

CW 発振で波長可変範囲 56.5 nm を実現した報告もある<sup>7)</sup>。

### 3. Cr イオンドープレーザー

表 1 から明らかなように、 $1.5 \mu\text{m}$  程度までの可視から近赤外域の波長可変固体レーザーのほとんどは、Cr イオン ( $Cr^{4+}$ ,  $Cr^{3+}$ ) ドープレーザーである。ここでは、代表的なレーザーについて研究の動向などについて触れる。

#### 3.1 クロムフォルステライトレーザー<sup>26-30)</sup>

クロムフォルステライトは  $1.17 \sim 1.35 \mu\text{m}$  で発振する<sup>29)</sup>。吸収がその発振波長に近いこともあり、励起光源には主に Nd:YAG レーザーの基本波が用いられる。再生モード同期法により  $1.21 \sim 1.26 \mu\text{m}$  の波長可変範囲において、光出力 380 mW、パルス幅 48 fs の超短光パルス列が得られている<sup>30)</sup>。また、同時にこの出力光を  $LiIO_3$  を用いて波長変換することにより、 $605 \sim 635 \text{ nm}$  の波長可変範囲において 116 fs (615 nm) の超短光パルス列が得られた<sup>30)</sup>。

#### 3.2 Cr:YAG レーザー<sup>31-33)</sup>

Cr:YAG レーザーは、LD および Nd:YAG レーザーによる励起が可能なレーザー媒質で、通信用光ファイバーの低損失領域およびアイセーフ領域である  $1.32 \sim 1.53 \mu\text{m}$  で発振する<sup>31)</sup>。励起光源に Nd:YAG レーザーを用いた自己モード同期法により、パルス幅 90 fs の超短光パルス列が光出力 360 mW、繰返し 110 MHz、波長可変範囲  $1.49 \sim 1.56 \mu\text{m}$  で得られた<sup>32)</sup>。

また、プリズム対の代りに OH イオンを添加した石英ロッドを用いて分散を補償し、スペクトル幅 42 nm、パルス幅 60 fs の超短光パルス列も得られている<sup>33)</sup>。

#### 3.3 Cr:LiSAF レーザー<sup>8-24)</sup>

##### 3.3.1 Cr:LiSAF レーザー媒質

Cr:LiSAF は、比較的新しいレーザー媒質であり<sup>8)</sup>、 $780 \sim 1010 \text{ nm}$  でレーザー発振が確認されている<sup>9)</sup>。表 2

表 2 Cr:LiSAF, Cr:LiCAF, チタンサファイアレーザー結晶の諸特性<sup>10)</sup>。

| 特性項目                                       | Cr:LiSAF | Cr:LiCAF | チタンサファイア |
|--|----------|----------|----------|
| 波長可変範囲 (nm)                                | 780-1010 | 720-840  | 680-1100 |
| 屈折率  | 1.4      | 1.39     | 1.76     |
| 誘導放出断面積 ( $\times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) | 4.8      | 2.4      | 30       |
| 蓄積緩和時間 ( $\mu\text{s}$ )                   | 67       | 170      | 3.2      |
| 熱拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )           | 0.02     | 0.02     | 0.15     |
| 非線形屈折率 ( $\times 10^{-13} \text{ esu}$ )   | 0.50     | 0.43     | 1.3      |
| 広帯域吸収                                      | ◎        | ◎        | △        |
| 機械強度                                       | △        | △        | ◎        |

にCr:LiSAF, Cr:LiCAF, チタンサファイアの諸特性<sup>10)</sup>を示す。Cr:LiSAFは、チタンサファイアと比較すると誘導放出断面積が約1/6であるが、蓄積緩和時間が約20倍大きい。Cr:LiSAFは、広帯域の吸収があるので、フラッシュランプ励起のレーザー増幅器にも適している。一方、機械強度と熱拡散係数が小さい。したがって、大出力光強度を取り出す場合には、冷却に工夫が必要となる。また、非線形屈折率が小さいので、カーレンズモード同期する場合には、共振器内レーザー光をチタンサファイアより高強度にする必要がある。以上の長短はあるが、吸収波長域が650 nmより長波長にもあり、既存のLDで直接励起が可能である。

### 3.3.2 広帯域波長可変全固体Cr:LiSAFレーザー

LD励起Cr:LiSAFレーザーで、広帯域波長可変制御を初めに実現したのはZhangらである<sup>11)</sup>。彼らは、出力42 mW、波長670 nmのInGaAlP-LD光で、Cr<sup>3+</sup>を10%ドーブした厚さ0.5 mmの結晶を励起した。結晶の両端にコーティングが施されておりレーザー共振器を構成する。これとは別に出力鏡を配置し複合共振器とした。レーザー結晶と出力鏡までの共振器内の偏光子、波長板および可変複屈折素子を用いて構成したリオフィルターで波長を変化させた。このようにして、850~935 nmの波長可変制御を実現した。

これとよく似た構成で、筆者らもLD励起波長可変レーザーを実現した<sup>12-15)</sup>。図2に、レーザーの構成を示す。レーザーは結晶の励起光入射端面から凹面鏡までの主共振器と、凹面鏡から平面鏡までの副共振器からなる複合共振器である。凹面鏡には反射率99.2%のミラーを、平面鏡には全反射鏡を用いた。主共振器からの出力光はコリメートレンズで平行光になり、プリズムで分光された後、平面鏡で反射して主共振器に戻される。このように、副共振器は、主共振器からのレーザー光の波長

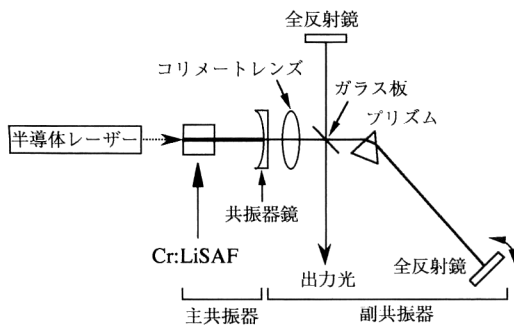


図2 波長選択自己注入同期法(SSSIL)を適用した広帯域波長可変全固体Cr:LiSAFレーザーの構成。

を選択・純化して再び主共振器へフィードバックさせる作用をする。

出力光はガラス板からの反射で得た。このガラス板の一方の面に広帯域で反射率が約9%の誘電体多層膜が、他方の面に反射防止膜が施してある。ガラス板をレンズとプリズムの間に配置したのは、ビーム広がり角が小さく、ビーム位置の安定した出力光を得るためである。また、コリメートレンズにも反射防止膜を施して用いた。発振波長の制御は平面鏡のあおりを調整して行った。

2つのLDの出力光を偏光ビームスプリッターで合成して、143 mWの光強度を得て、これを励起光に用いた。この構成では、主共振器はたえず発振しており、副共振器で波長可変制御を行う。したがって、主共振器の調整と副共振器における発振波長の選択・制御は独立しているため、調整が容易になるという利点を有している。筆者らは、この方法を波長選択自己注入同期法(spectrum selection self-injection-locking: SSSIL)と名付けた<sup>12)</sup>。

図3に得られたチューニングカーブを示す。この図には前述のZhangらの得た結果も点線で示した。筆者らの実験では、897 nmで最大出力光強度41 mW、821.8~922.5 nmで100.7 nmにわたる連続波長可変制御を達成した。また、波長可変範囲の両端、すなわち短波長端(821.8 nm)と長波長端(922.5 nm)の出力光強度は、それぞれ9.5 mWおよび25.8 mWであった。このようにSSSILを用いることにより、従来より高出力でフラットなチューニングカーブが得られた。発振スペクトル幅は、いずれの波長においても2 nm以下であった。

この後、リングレーザー<sup>16)</sup>や反射グレーティングを

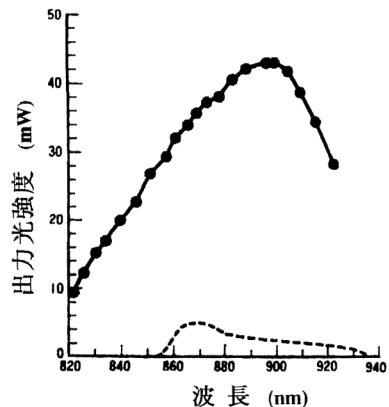


図3 広帯域波長可変全固体Cr:LiSAFレーザーのチューニングカーブ。実線は図2に示したレーザーで得られたカーブであり、点線はZhangらの結果を示す。

用いた SSSIL<sup>17)</sup> で単一周波数の全固体波長可変レーザーが実現された。特に、後者では 148 nm にわたる波長可変制御を実現している。

### 3.3.3 全固体フェムト秒 Cr:LiSAF レーザー

Cr:LiSAF で全固体フェムト秒レーザーが実現されている。当初、過飽和吸収体を用いた受動モード同期法で実現されたが、しだいにカーレンズモード同期が利用されるようになり<sup>18)</sup>、最近では、数か所で 50 fs 以下の光パルス発生が実現された<sup>19-22)</sup>。共振器外部に分散補償用のプリズム対を配置し、スペクトル波形が非対称で短波長側に小さいサブピークをもつが 19 fs の光パルスが得られたことも報告されている<sup>19)</sup>。

筆者らは、最初からカーレンズモード同期の実現を目指して研究を行ってきた<sup>14, 15)</sup>。図 4 に、全固体フェムト秒 Cr:LiSAF レーザーの構成を示す<sup>21)</sup>。Z 型の共振器とし、結晶の長さは 8 mm である。レーザー発振の閾値を下げるために、結晶の温度を  $17 \pm 0.1^\circ\text{C}$  に制御して実験した。分散補償用のプリズム対として合成石英を用い

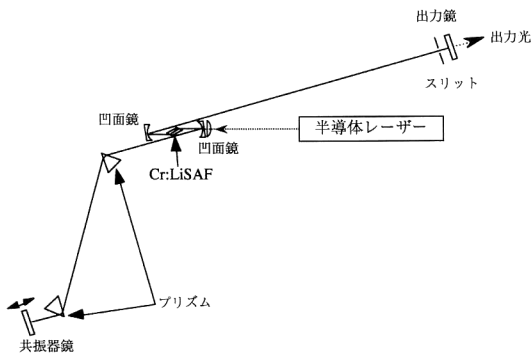


図 4 全固体フェムト秒 Cr:LiSAF レーザーの構成。

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。モード同期はスピーカーに取り付けられた出力鏡を 200  $\mu\text{m}$  程度振動させることにより始動し、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。

この構成でトランスフォーム限界の 30 fs の光パルスが得られた<sup>22)</sup>。パルス幅の測定は、分散のほとんどないアルミの反射鏡で構成した SHG 自己相関波形測定装置で行った<sup>21)</sup>。図 5 にそのデータを示す。左側に SHG 自己相関波形、右側にスペクトル波形を示す。SHG 自己相関波形の図では、パルス波形を  $\text{sech}^2$  と仮定したとき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。図の右上部に SHG 自己相関波形から求めた光パルス幅  $\Delta\tau$  の値を示した。右側に示したスペクトル波形のデータには、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。

レーザーの発振閾値は 40 mW であった。最大励起光強度 430 mW に対する出力光強度は光出力 2.6 mW であり、繰返し 89.4 MHz の光パルス列が得られた。モード同期の閾値は、268 mW であった。また、ピーク波長 907.6 nm、スペクトル幅 29.1 nm であった。全固体 Cr:LiSAF レーザーから 50 fs 以下でトランスフォーム限界の理想的な超短光パルスを直接得た例は、筆者らの知る限り他に例がない。

その他、共振器長が 84 cm のコンパクトな全固体 Cr:LiSAF レーザーで、saturable bragg reflector (SBR) を用いた受動モード同期法により、パルス幅 100 fs ( $\Delta\nu \cdot \Delta\tau = 0.316$ )、178 MHz の高繰返し光パルス列が得られている<sup>23)</sup>。励起光強度 380 mW に対して光出力 11

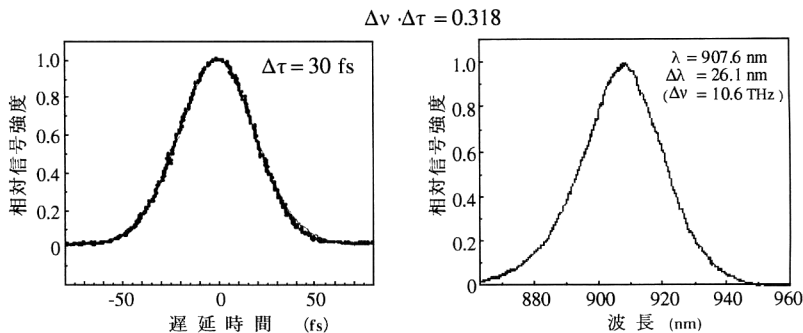


図 5 全固体フェムト秒 Cr:LiSAF レーザーからのトランスフォーム限界の光パルスの測定結果。左側に SHG 自己相関波形、右側にスペクトル波形を示す。SHG 自己相関波形の図は、パルス波形を  $\text{sech}^2$  と仮定したときの理論曲線を実線で示し、得られたデータをドットで示した。

mWであった。

筆者らも、ごく最近、新しい小型のレーザー構成で、高繰返しフェムト秒光パルス列を得ることに成功した<sup>24)</sup>。BK7の位相分散補償用プリズム対の間にレーザー媒質を配置することを着想し、小型化を図った。この結果、カーレンズモード同期により、繰返し周波数235 MHz (共振器長64 cm)、89 fsの光パルスの発生に成功した。このレーザーは、パルス繰返し周波数を可変制御できる可能性がある。この新しいレーザーの構成は、他のフェムト秒レーザーに適用可能であり、広く利用されると期待される。

### 3.4 Cr:LiSGAF レーザー<sup>42-44)</sup>

Cr:LiSGAFもCr:LiSAFと同じように、既存のLDで直接励起が可能なレーザー媒質である<sup>42,43)</sup>。Cr:LiSAFと比較すると散乱損失が小さい、さらに熱膨張係数が小さいために熱レンズ効果が小さい。その結果、効率が向上すると共に励起光の過大入力によるレーザー出力の飽和が緩和される。Cr<sup>3+</sup>が2.5%ドープされた長さが5 mmの結晶を用いて励起光強度680 mWに対して光出力35 mW、パルス幅100 fs ( $\Delta\nu \cdot \Delta t = 0.35$ )、繰返し71 MHzの光パルス列が得られている<sup>44)</sup>。波長可変範囲は810~860 nmであった。

本稿では、1.5  $\mu\text{m}$ 程度までの可視から近赤外域の波長可変固体レーザーについて分類、整理してその発振波長域などを述べ、代表的な波長可変固体レーザーの研究動向について報告し、筆者らが研究を行っている全固体Cr:LiSAFレーザーについて報告した。特に、超短パルスレーザーの観点からも述べた。

一部では、全固体フェムト秒Cr:LiSAFレーザーで波長可変制御が実現されており<sup>19,20)</sup>、また、全固体増幅器も実現されつつあり<sup>20)</sup>、現在の代表的な波長可変固体レーザーであるチタンサファイアレーザーが果たしている役割を、全固体化して行える可能性が高く、今後の発展が期待される。

研究・調査の機会を与えてくださった浜松ホトニクス株式会社代表取締役社長晝馬輝夫、中央研究所所長の鈴木義二博士の両氏に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) T. H. Maiman: "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature*, **187** (1960) 493-494.
- 2) P. F. Moulton: "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *J. Opt. Soc. Am. B*, **3** (1986) 125-132.
- 3) 石田祐三: "フェムト秒パルスレーザーの発展—色素から固体へ—," *応用物理*, **60** (1991) 883-890.

- 4) D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbett: "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 42-44.
- 5) J. Zhou, G. Taft, C. Huang, M. M. Murane, H. C. Kapteyn and I. P. Christov: "Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 1149-1151.
- 6) M. R. Payne and J. G. Fujimoto: "Compact dispersion compensation geometry for Kerr-lens mode-locked femtosecond lasers," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 1756-1758.
- 7) L. Wu, A. Wang, J. Wu, L. Wei, G. Zhu and S. Ying: "Growth and laser properties of Ti:sapphire single crystal fibers," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 1151-1152.
- 8) S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway and H. W. Newkirk: "Laser performance of LiSrAlF<sub>6</sub>: Cr<sup>3+</sup>," *J. Appl. Phys.*, **66** (1989) 1051-1056.
- 9) M. Stalder, B. H. T. Chai and M. Bass: "Flashlamp pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 216-218.
- 10) Data Sheet 2002 (Lighting Optical Corp., Tarpon Springs, Fla, 1992).
- 11) Q. Zhang, G. J. Dixon, B. H. T. Chai and P. N. Kean: "Electronically tuned diode-laser-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 43-45.
- 12) 青島紳一郎, 伊藤晴康, 大林 寧, 平野伊助: "Cr:LiSAF レーザー", 電気学会光・量子デバイス研究会資料, OQD-92-13 (1992) 13-20.
- 13) 青島紳一郎: "Cr:LiSAF レーザー", O plus E, No.157 (1992) 102-109.
- 14) 青島紳一郎, 伊藤晴康, 黒柳和良, 大林 寧, 土屋 裕: "半導体レーザー励起Cr:LiSAF レーザー", レーザー学会研究会報告, RTM-94-23 (1994) 7-12.
- 15) S. Aoshima, H. Itoh, K. Kuroyanagi, Y. Takiguchi, Y. Ohbayashi, I. Hirano and Y. Tsuchiya: "All solid-state Cr:LiSAF laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **44** (1995) 972-976.
- 16) H. H. Zenzie, A. Frinch and P. F. Moulton: "Diode-laser pumped, single-frequency Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> ring laser," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2207-2209.
- 17) M. Ihara, M. Tsunekane, N. Taguchi and H. Inaba: "Widely tunable, single-longitudinal-mode, diode pumped CW Cr:LiSAF laser," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 888-889.
- 18) M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson: "Self-mode-locked diode-pumped Cr:LiSAF laser," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 1988-1990.
- 19) M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson: "Self-mode-locked diode-pumped Cr:LiSAF laser producing 34-fs pulses at 42-mW average power," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1157-1159.
- 20) R. Mellish, N. P. Barry, S. C. W. Hyde, R. Jones, P. M. W. French, J. R. Taylor, C. J. van der Poel and A. Valster: "Diode-pumped Cr:LiSAF all-solid-state femtosecond oscillator and regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2312-2314.
- 21) 青島紳一郎, 伊藤晴康, 黒柳和良, 土屋 裕: "全固体Cr:LiSAF レーザーによる44フェムト秒パルスの発生", レーザー研究, **23** (1995) 996-1001.
- 22) 伊藤晴康, 青島紳一郎, 土屋 裕: "全固体フェムト秒Cr:LiSAF レーザーからの30フェムト秒パルスの発生", レーザー学会学術講演会第16回年次大会予稿 (1996) p. 108.
- 23) S. Tsuda, W. H. Knox, E. A. de Souza, W. Y. Jan and J. E. Cunningham: "Low-loss intracavity AlAs/AlGaAs saturable Bragg reflector for femtosecond mode locking in solid-state lasers," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1406-1408.

- 24) 伊藤晴康, 青島紳一郎, 土屋 裕: “小型全固体 Cr:LiSAF フェムト秒レーザー”, 第 43 回応用物理学関係連合講演会予稿 (1996) p.976.
- 25) カタログ“Millenia” (Spectra-Physics Lasers, Inc., Mountain View, CA, 1996).
- 26) V. Petricevic, S. K. Gayen, R. R. Alfano, K. Yamagishi, H. Anzai and Y. Yamaguchi: “Laser action in chromium doped forsterite,” *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 1040-1042.
- 27) V. Petricevic, S. K. Gayen and R. R. Alfano: “Laser action in chromium-activated forsterite for near-infrared excitation: Is Cr<sup>4+</sup> the lasing ion?,” *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1988) 2590-2592.
- 28) T. J. Carrig and C. R. Pollock: “Performance of a continuous-wave forsterite laser with krypton ion, Ti: sapphire, and Nd: YAG pump lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2835-2844.
- 29) V. Petricevic, S. K. Gayen and R. R. Alfano: “Near infrared tunable operation of chromium doped forsterite laser,” *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1609-1611.
- 30) A. Sennaroglu, C. R. Pollock and H. Nathel: “Generation of tunable femtosecond pulses in the 1.21-1.27  $\mu\text{m}$  and 605-635 nm wavelength region by using a regeneratively initiated self-mode-locked Cr:forsterite laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 1851-1861.
- 31) H. Eilers, W. M. Dennis, W. M. Yen, S. Kuck, K. Peterman, G. Huber and W. Jia: “Performance of a Cr:YAG laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2508-2512.
- 32) P. J. Conlon, Y. P. Tong, P. M. W. French, J. R. Taylor and A. V. Shestakov: “Sub-100 fs Kerr lens modelocked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser,” *Electron. Lett.*, **30** (1994) 709-710.
- 33) Y. Ishida and K. Naganuma: “Characteristics of femtosecond pulses near 1.5  $\mu\text{m}$  in a self-mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser,” *Opt. Lett.*, **19** (1994) 2003-2005.
- 34) C. Deka, B. H. T. Chai, Y. Smimony, X. X. Zhang, E. Munin and M. Bass: “Laser performance of Cr<sup>4+</sup>: Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>,” *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 2141-2143.
- 35) J. C. Walling, O. G. Peterson, H. P. Jenssen, R. C. Morris and E. W. O'Dell: “Tunable alexandrite lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **16** (1980) 1302-1315.
- 36) J. C. Walling, D. F. Heller, H. Samelson, D. J. Harter, J. A. Pete and R. C. Morris: “Tunable alexandrite lasers: development and performance,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **21** (1985) 1568-1581.
- 37) R. Sheps, B. M. Gately, J. F. Myers, J. S. Krasinski and Q. F. Heller: “Alexandrite laser pumped by semiconductor lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 2288-2290.
- 38) S. T. Lai: “Highly efficient emerald laser,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **4** (1987) 1286-1290.
- 39) S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith and W. F. Krupke: “LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>: A promising new solid-state laser material,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 2243-2252.
- 40) R. Scheps: “Cr:LiCaAlF<sub>6</sub> laser pumped by visible laser diodes,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1968-1970.
- 41) B. H. T. Chai, J. Lefaucheur, M. Stalder and M. Bass: “Cr:LiSr<sub>0.8</sub>Ca<sub>0.2</sub>AlF<sub>6</sub> tunable laser,” *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1584-1586.
- 42) L. K. Smith, S. A. Payne, W. L. Kway, L. L. Chase and B. H. T. Chai: “Investigation of the laser properties of Cr<sup>3+</sup>: LiSrGaF<sub>6</sub>,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2612-2618.
- 43) R. Scheps: “Laser-diode-pumped Cr:LiSrGaF<sub>6</sub> laser,” *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **4** (1992) 548-550.
- 44) Y. P. Yanovsky, F. W. Wise, A. Cassanho and H. P. Jenssen: “Kerr-lens mode-locked diode-pumped Cr: LiSGAF laser,” *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1304-1306.
- 45) B. Struve and G. Huber: “Laser performance of Cr<sup>3+</sup>:Gd (Sc, Ga)garnet,” *J. Appl. Phys.*, **57** (1985) 45-48.
- 46) S. T. Lai, B. H. T. Chai, M. Long and M. C. Shinn: “Room temperature near-infrared tunable Cr:La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>-SiO<sub>14</sub> laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 1922-1926.
- 47) J. A. Caird, S. A. Payne, P. R. Staver, A. J. Ramponi, L. L. Chase and W. F. Krupke: “Quantum electronic properties of the Na<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>Li<sub>3</sub>F<sub>12</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 1077-1099.
- 48) S. T. Lai, B. H. T. Chai, M. Long and R. C. Morris: “ScBO<sub>3</sub>:Cr-A room temperature near-infrared tunable laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **22** (1986) 1931-1933.
- 49) H. P. Jenssen and S. T. Lai: “Tunable-laser characteristics and spectroscopic properties of SrAlF<sub>4</sub>:Cr,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **3** (1986) 115-118.
- 50) W. Kolbe, K. Petermann and G. Huber: “Broadband emission and laser action of Cr<sup>3+</sup> doped zinc tungstate at 1  $\mu\text{m}$  wavelength,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **21** (1985) 1596-1599.
- 51) U. Brauch and U. Durr: “Vibronic laser action of V<sup>2+</sup>: CsCaF<sub>3</sub>,” *Opt. Commun.*, **55** (1985) 35-40.
- 52) L. F. Johnson and H. J. Guggenheim: “Phonon-terminated coherent emission from V<sup>2+</sup> ions in MgF<sub>2</sub>,” *J. Appl. Phys.*, **38** (1967) 4837-4839.
- 53) P. Lacovara, H. K. Chai, C. A. Wang, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: “Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser,” *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1089-1091.
- 54) C. Honninger, G. Zhang, U. Keller and A. Giesen: “Femtosecond Yb:YAG laser using semiconductor saturable absorbers,” *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2402-2404.