

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - b > フェムト秒レーザーの開発

小テーマ： レーザーシステムの小型化の研究

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 中野文彦、松岡伸一、瀧口義浩

## 1. はじめに

< 1 - 1 > において作製する実証レーザーシステムは、フェムト秒光パルスが発生し、それを光学増幅器を用いてTWのピークパワーまで増幅する装置である。その際に重要であるフェムト秒TWレーザーの種光を発生させるために、現在は< 1 - 1 - a >にて開発しているCWで駆動するYAG-SHGレーザーにて励起したTi:Sapphireレーザーを立ち上げている。この種となるフェムト秒パルスを発生させるための産業用次期フェムト秒光源は、LD直接励起によってフェムト秒パルスを発生するCr:LiSAFあるいはフェムト秒パルスを直接発生するLDであると考えられる。後者は、本事業における研究範囲を越えているため、前者を本事業において開発する光源として検討した。Cr:LiSAFは、高効率であるために、670nmの1W出力の単一LDによってフェムト秒パルス発振するものと考えた。本地域において協力をいただいている浜松ホトニクス株式会社では、670nmにおいて1Wを越えるLDを開発しており、これを用いることで1つのLDによって励起されたCr:LiSAF結晶から、共振器の波長分散を制御してフェムト秒レーザーパルスを直接得ることができるようになる。これにより、本事業における実証レーザーシステムの主発振器の構造が小型化され、高効率での動作が可能となる。

本小テーマは、本事業のフェーズIIにて開発する実証レーザーシステムBの主発振器を開発することを目的とし、フェーズIでは、高出力の単一LDチップによりCr:LiSAFを励起し、高効率のCWレーザー発振をさせる実験を介して、信頼性の高い共振器構造の設計を行う。フェーズIIでは、このレーザーに過飽和吸収による非線形モード同期、あるいはカー効果を用いたモード同期をかけ、共振器内の分散補正を小型のプリズムあるいは分散補正ミラーなどを用いて達成し、少なくとも30mW程度の出力で、時間幅にして50フェムト秒程度のフェムト秒パルス動作のLD励起小型レーザーを提供する。

その際のレーザー結晶も、本事業にて検討を進めている高効率の冷却が可能な金属導波路を用いることで、より熱的に安定した動作が可能となる実際にLDを用いた励起では、空間モードのマッチングなどの困難があったが、連続発振とパルス発振を達成した。パルス発振のために、半導体過飽和吸収体を用いた結果、中心波長が827nmのスペクトル幅1nmで、時間幅が1ピコ秒のパルスを得ることができた。

## 2. Cr:LiSAF結晶の光学特性評価

始めに、Cr:LiSAF結晶の光励起における励起光の偏光依存特性をするために、偏光依存蛍光励起スペクトルを計測し、励起波長である670nmにおける励起軸の決定を行った。

図1には、文献やカタログに示されている蛍光および球種特性データである。本質的には、このような分布になることは間違いはないが、結晶の成長条件などのばらつきの影響は、蛍光波長である800nmに検出器の波長を設定し、結晶を励起する波長を連続的に変えて、800nmにおける蛍光強度をモニターすることで、結晶の光吸収スペクトルの励起光偏光依存性を評価した。評価装置の構成図を図2に示している。およそ100Hzにてパルス発光するランプからの白色光を分光器に結合し、単色化した後に、これを試料となるレー

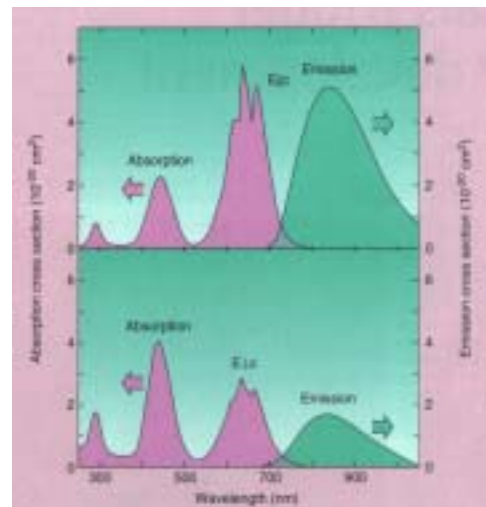


図1 蛍光と吸収スペクトル

ザー結晶に照射し、そこからの蛍光を第2の分光器とそれにつけた光電子増倍管により電気信号に変換する。電気信号はランプのパルスの繰り返し周波数によりロックイン計測される。単色化用分光器の波長を走査し、検出側の蛍光観測用分光器を蛍光波長の適当なところで固定して計測することで、蛍光励起スペクトル(PLE)が得られ、これは結晶の光学吸収特性に対応する。逆に、単色化用分光器を固定し、蛍光観測用分光器の波長を走査することで、結晶の蛍光分布の計測が可能となる。その結果、本事業で購入した結晶の配置に対してp偏光が結晶を650~670nmの領域で効率良く励起することが明らかとなった。さらに670nmにて結晶を励起した際に得られる蛍光の偏光依存性も同時に評価を行った。ここでも、上記と同様にp偏光の励起に対応した蛍光強度の増大が観測された。その際の蛍光スペクトル幅も、100nm以上あることから、モード同期ができれば、理論的には10フェムト秒程度の光パルスの発生も可能であることがわかった。

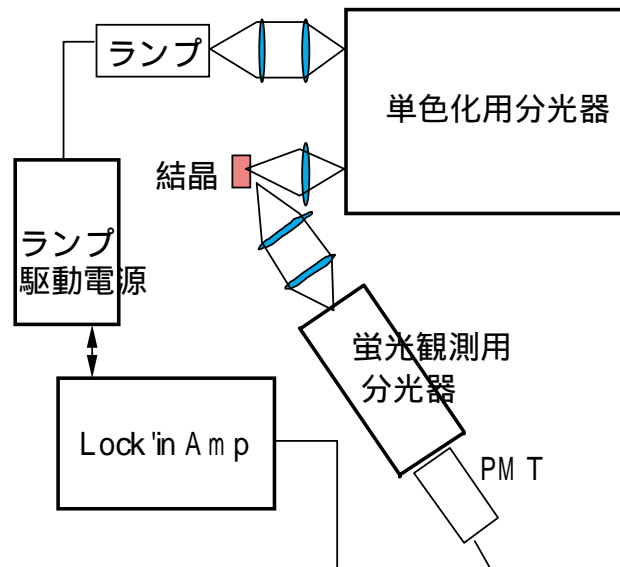


図2 蛍光励起分光実験装置

以下に蛍光励起スペクトルを計測した結果を図3に示す。第2の分光器の波長を800nmに固定し、ロックインアンプからの出力を単色化用分光器を走査しながらデータを取得した結果を示した。図1に示されたカタログデータと同様に、450nmと670nmに2つの吸収ピークを有するPLEスペクトルが得られた。ここでは、結晶の1軸性を考慮して、蛍光励起分布計測時に、試料前に偏光板を挿入し、レーザーの結晶軸に対して偏光を換えて励起したときの蛍光励起スペクトルを示した。図からは、励起光の偏光によって670nmのピークにおける吸収特性に差が大きく見られることをよく示している。このデータもカタログに示された状態によく対応している。

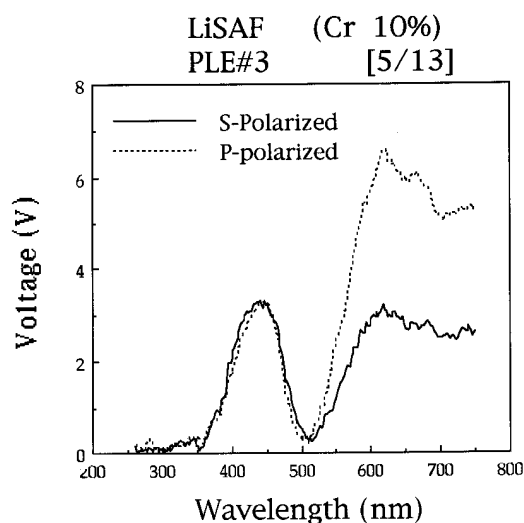


図3 PLEの励起偏光依存性

つぎ、結晶からの蛍光スペクトルの計測を行った。その際、上記のような励起の偏光のみを変えて、その吸収などの差を含む蛍光強度の違いとして計測した。

励起波長として450nmと670nmを選択し、それぞれの励起における蛍光発光の偏光励起に対する依存性を計測した。その結果を図4にまとめて示した。

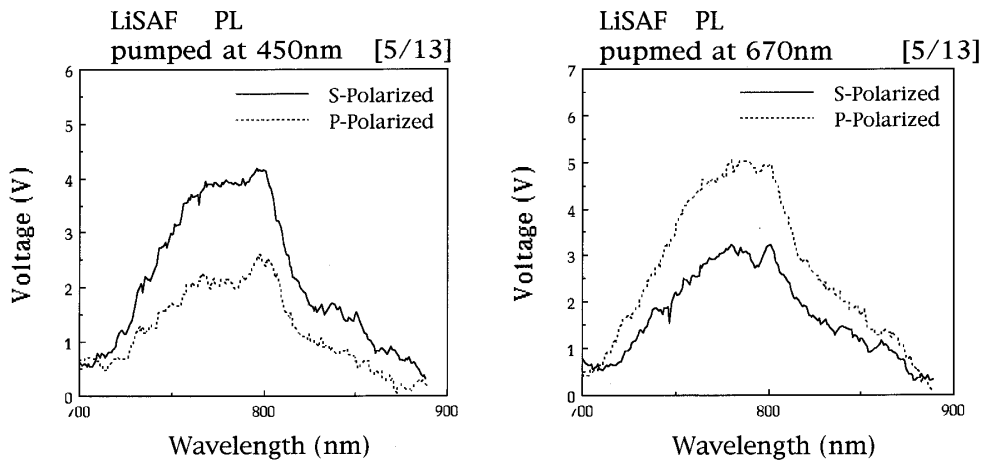


図4 450nmと670nmの偏光励起による蛍光スペクトル

励起波長によって、S偏光とP偏光での蛍光強度が異なるのは、それぞれの吸収係数の違いによるものであるが、450nmにおいて偏光依存性が見えるのは結晶の再吸収によるものであろう。

以上のことから、Cr:LiSAFをレーザー媒質として用いる際には、結晶の線膨張係数の軸方向依存性と、励起光の吸収の軸方向依存性の両方を考慮することが必要であるという2つの重要なポイントがあることがわかる。

### 3. CWレーザー発振実験

Cr:LiSAF結晶によるCWのレーザー発振を確かめるために、簡単な共振器を組み上げ、それを633nmの波長を有するヘリウム・ネオンレーザーにより励起して発振を試みた。

図5には、その実験構成を示した。用いたHe-Neレーザーは、NEC GLG5700で最大14mWの直線偏光出力を得ることができるものである。径が1.3mmのビームをレンズを介してCr:LiSAF結晶のHRコートした裏面に集光し、反対の面に対向して凹面鏡を配置した。凹面鏡の曲率は1000mmであり、800nmに反射の中心波長を持ったコーティングが施されている。また、発振の出力をモニターするために、高感度SITカメラを配置し、その出力をTVモニターにて観測した。レーザー発振が得られれば、リアルタイムにてTVモニター上にビームの観測がなされる。

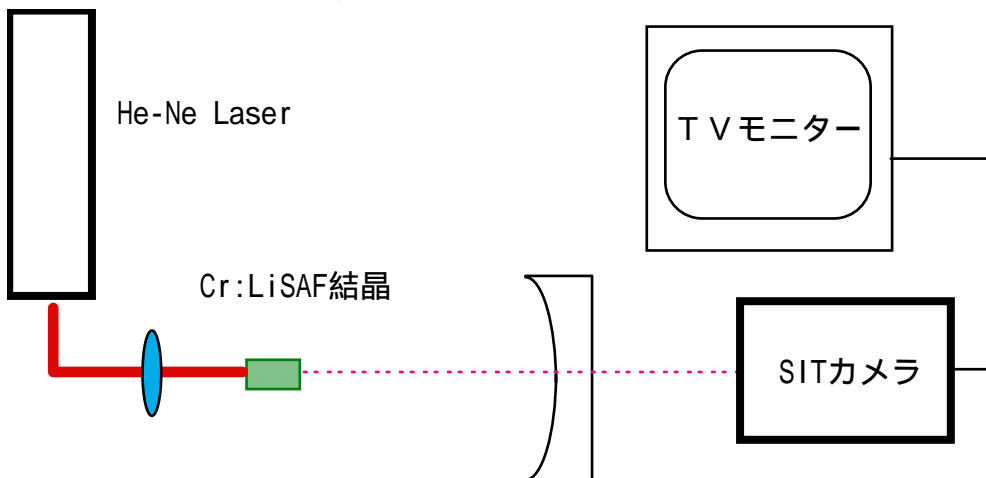


図5 CW He-Neレーザー励起発振実験構成図

この状態で、共振器の調整を行い、CW励起にてレーザー発振を確認した。その際、He-Ne レーザーの励起強度を下げていって、最終的にどの程度のパワーにて発振するかを確認をしたところ、わずか9mWの極低光強度でも発振を得ることができた。

このことは、Cr:LiSAF 結晶の蛍光寿命が67マイクロ秒とTi:S レーザー結晶のそれより長いために、低閾値の発振が可能であることを示している。

#### 4. LD 励起CW発振実験

表1に示したような特性を有する670nmの高出力LDを、浜松ホトニクス株式会社からご提供いただき、これを用いた系の構築を行なった。

表1 LD 特性

Laser Characteristics		
Center Wavelength(nm)	680	
Spectral Width(nm)	2	
Emitting Dimensions( $\mu\text{m}$ )	250 $\times$ 1	
Beam Divergence(degrees)	Parallel to Junction	6
	Prep. to Junction	40
Max.Operating Current (A)	1.1	

最初にCr:LiSAF 励起用LD2台の出力測定を行った。測定はパワーメーターを用いて行い、LD 発光面に出来るだけ近づけて測定を計測した。結果を図6に示す。

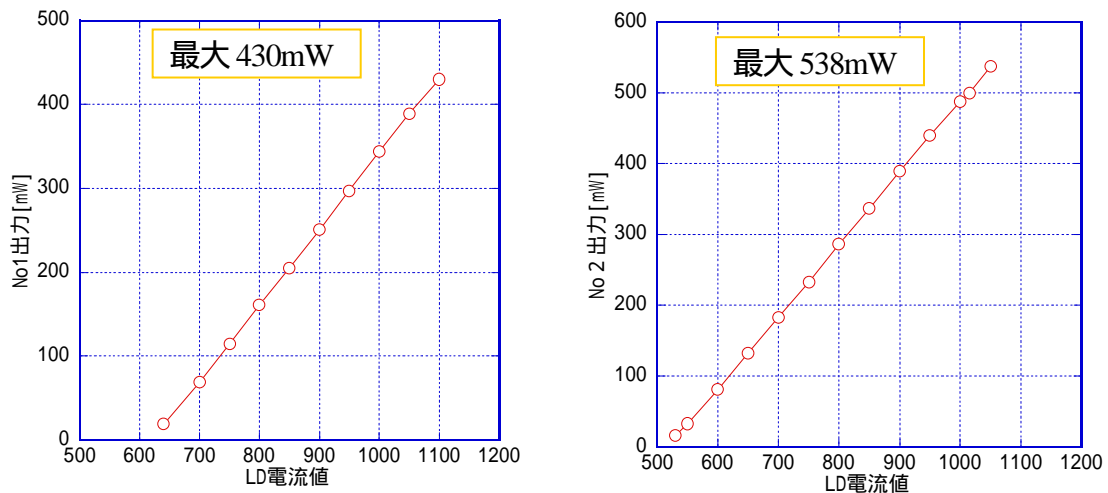


図6 2台のLDにおける出力特性

#### 4.1. LD 光のコリメート

LD から発振する光は大きな分散角を有しているため、数cmの距離を伝搬しただけで大きな拡がりが生じる。そこで、LD 光をコリメートする目的で、コリメーティングレンズ( $f=6.5\text{mm}$ )およびアナモルフィックプリズムペア(2 $\times$ , 3 $\times$ , 6 $\times$ )を設置し、倍率が異なるアナモルフィックプリズムペアの特性を評価した。集光には680nm用レンズを所持していないため、532nm用  $f=+50\text{mm}$  を用いた。また、LD の電流値は580mA(45mW)に設定をしている。

焦点位置のプロファイル、集光前のプロファイル、焦点位置のビームサイズおよびLD 光の透過

率を図7に示す。

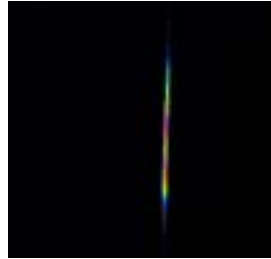
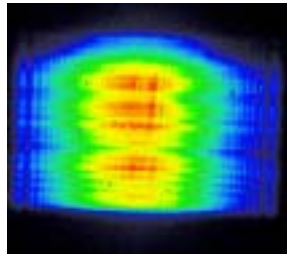
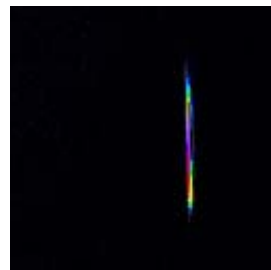
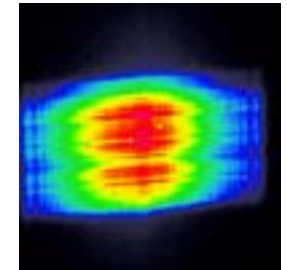
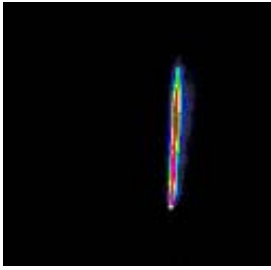
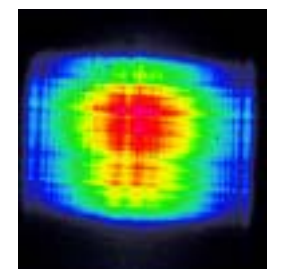
アナモルフィックプリズムペアの倍率	集光プロファイル	集光前プロファイル	集光ビームサイズおよびLDの透過率
2倍			X: 27 $\mu\text{m}$ Y: 900 $\mu\text{m}$ T=98.0%
3倍			X: 18 $\mu\text{m}$ Y: 540 $\mu\text{m}$ T=98.9%
6倍			X: 36 $\mu\text{m}$ Y: 297 $\mu\text{m}$ T=89.6%

図7 各アナモルフィックプリズムペアにおける集光特性

3種類の異なるアナモルフィックプリズムペアを用いて、集光スポットサイズの計測を行った結果、6倍を用いても、最小スポットサイズ $X=36\mu\text{m}$ , $Y=297\mu\text{m}$ であった。しかし、透過率が89.6%と低下している。また、キャビティーモードとのモードマッチングを考慮すると、励起光の集光スポット直径は $100\mu\text{m}$ 程度が望ましいことから、継続してアナモルフィックプリズムペアを複合化して評価を行った。

#### 4.2. アナモルフィックプリズムペアの複合化

前項で $f=6.5\text{mm}$ のコリメーティングレンズおよび異なる3種類のアナモルフィックプリズムペアの組み合わせで集光特性を評価したところ、倍率6のアナモルフィックプリズムペアを用いることにより、最小スポット径 $X=36\mu\text{m}$ , $Y=297\mu\text{m}$ が得られている。しかし、共振器内のレーザー光スポット直径が約 $66\mu\text{m}$ (現状の共振器構成)の為、四準位系(実際は三準位だが、基底準位に励起振動準位が存在するので、四準位として振る舞う)のレーザー媒質では、励起光とレーザー光のマッチング効率を高めるため励起光はレーザー光スポットサイズ以下にする必要がある。

そこで、励起スポットサイズを減少させる目的で、アナモルフィックプリズムペアを組み合わせ

せてビームをコリメートし、集光スポットサイズの測定を行った。組み合わせ構成を図8に示す。

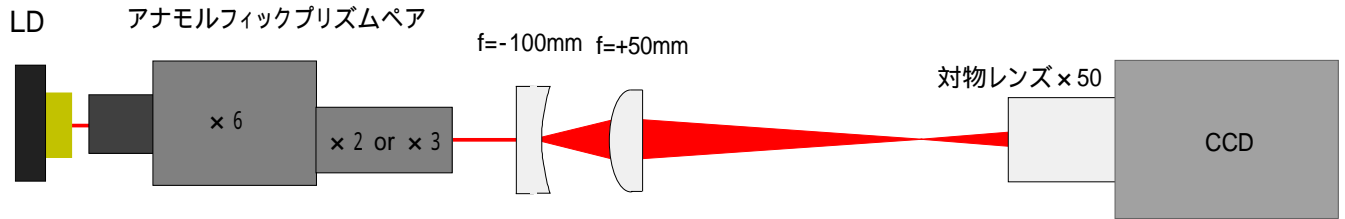


図8 複合アナモルフィックプリズムペアを用いたLDのコリメート・集光系構成

LD No1 は倍率2と倍率6のアナモルフィックプリズムペアの組み合わせで倍率12とし、LD No2 は倍率3と倍率6を用いて倍率18となるように構成している。

また、Cr:LiSAF 発振器を構成する曲率ミラーの間隔は100mmとなっているため、LDを集光する際は  $f=-100\text{mm}$  のレンズで拡大した後、 $f=+50\text{mm}$  のレンズで集光し、焦点距離を延長させている。(約72mm)集光プロファイルの測定は、倍率50の対物レンズを用いてCCDカメラにより観測を行った。測定した集光パターンを図9に示す。

前項に示す倍率6のアナモルフィックプリズムペアのみで測定した光束径と比較すると、297  $\mu\text{m}$  だったY軸がアナモルフィックプリズムペアを組み合わせたことによって、No1では143.4  $\mu\text{m}$ 、No2では116  $\mu\text{m}$  まで集光された。しかし、アナモルフィックプリズムペアを複合化させることにより、No.1では、67.4%、No.2では57.2%の透過率となり、LD光の損失が今後問題になると想定される。

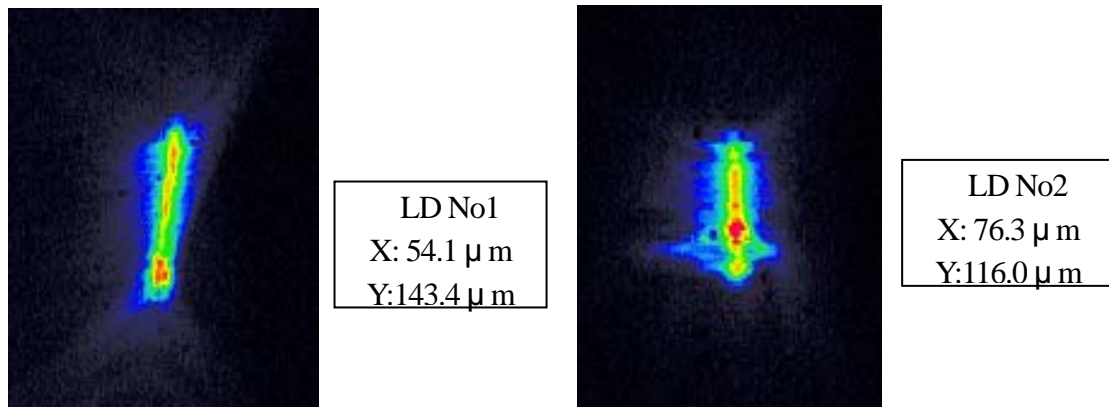


図9 LD集光パターン

#### 4.3. ロッドレンズとシリンドリカルレンズを用いたLD光のコリメート

アナモルフィックプリズムペアの複合化にともなう、LD光の損失を改善する目的で、現在所持しているロッドレンズ( $f=1.17\text{mm}$ , ロッド表面から)およびシリンドリカルレンズ( $f=30\text{mm}$ )の組み合わせでLD光のコリメートを行った。構成を図10に示す。その結果、LD出力の透過率は76%(入力430mW, 出力327mW)とアナモルフィックプリズムペアを用いた際よりも良好な結果ではあったが、共振器の構成上(曲率半径 $R=100\text{mm}$ の共焦点構成の為) $f=50\text{mm}$ 以上で集光する必要があり、その際の集光スポットサイズは  $X:432.7\mu\text{m}$ ,  $Y:75.1\mu\text{m}$  であった。(図11参照: ストライプ幅  $250\mu\text{m} \times$

50mm/30mm=416 μm なので、限界だと考えられる。)

また、ロッドレンズおよびシリンドリカルレンズのコリメート後に6倍のアナモルフィックプリズムペアを設置したが、透過率が26.3%(入力430mW,出力113mW)であり、またf=50mmのレンズで

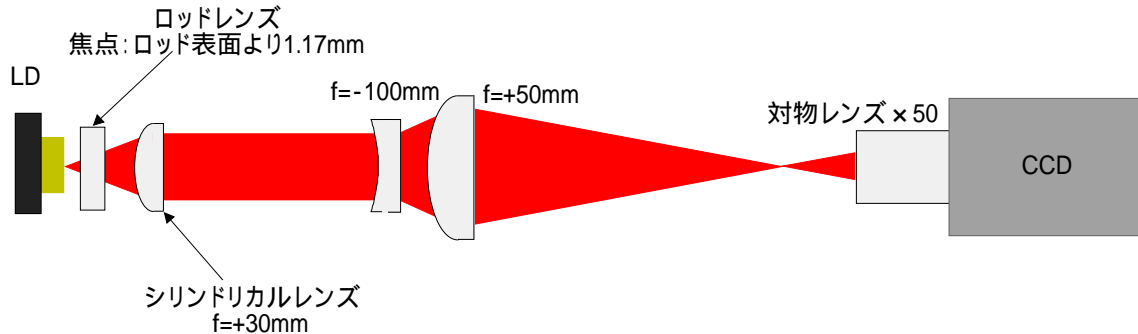


図10 ロッドレンズとシリンドリカルレンズの組み合わせによるLD光のコリメート配置図

集光した際のスポットサイズがX:174 μm,Y:117 μmの結果であった(図12)。

以上の結果から、現在所持している光学素子を用いる場合において、ロッドレンズ、シリンドリカルレンズを用いたLD光のコリメートは、アナモルフィックプリズムペアを用いた際よりも、集光サイズおよび透過率が劣っていることが分かった。しかし、焦点距離の異なるシリンドリカルレンズを用いることにより、透過率がよい組み合わせが可能だと考えられる。(シリンドリカルレンズのサイズが大きくなるが)

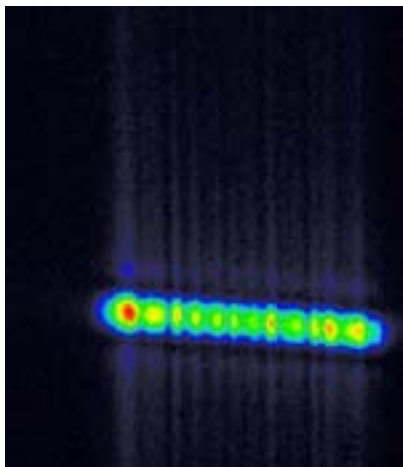


図11 ロッドレンズとシリンドリカルレンズの組み合わせによるLD光の集光スポット

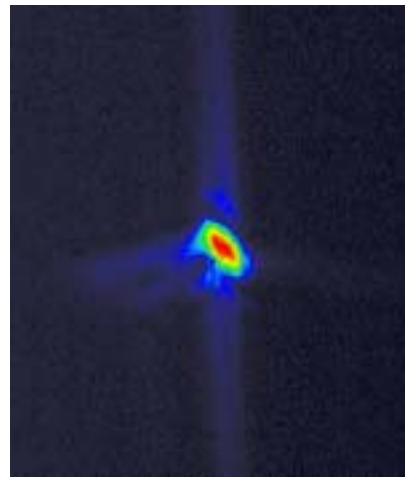


図12 6倍アナモルフィックプリズムペアを追加した際の集光スポット

#### 4.4 LD 励起直線型共振器構成

モード同期発振を行う為に必要なキャビティ構成(X型およびZ型)を構築する前に、基礎実験としてLD 励起直線型共振器を構成して発振実験を行った。

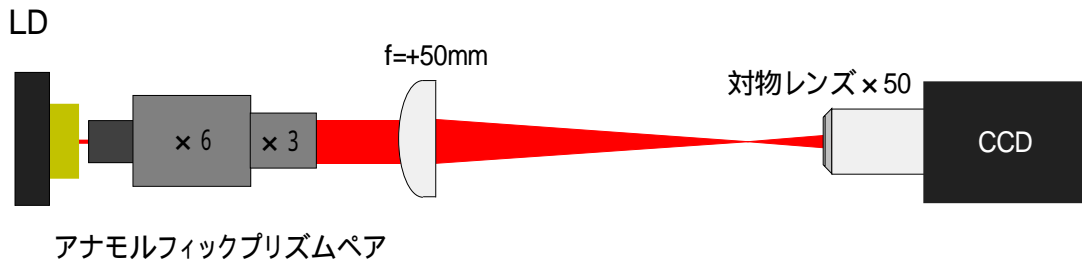


図 13 LD のコリメートとスポットサイズの測定構成

LD を用いた直線型共振器の構成を図 1 3 に示す。先ず LD の Fast Axis をコリメーティングレンズ(シグマ光機社製 06GLC001)でコリメートし、アナモルフィックプリズムペアー2 個(シグマ光機社製 06GPA004,06GPA003)で Slow Axis を 18 倍まで拡大した。ここで、コリメーティングレンズとアナモルフィックプリズムペアーの透過率はおよそ 58%である。その後、532nm 用 f=50mm レンズを用いて集光を行い、励起光最小スポットサイズの測定を行った。LD 電流 1100mA 時の集光前後のビームプロファイルを図 1 4 に示す。ここで、用いた集光レンズは LD 光の波長(680nm)用では無いため、透過率はおよそ 94%であった。

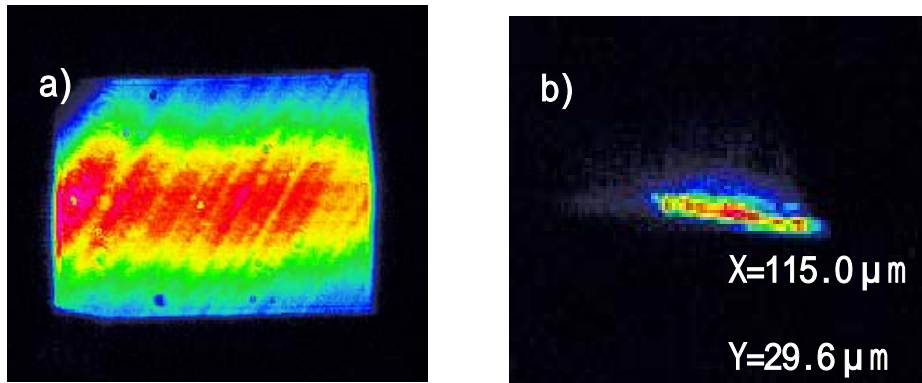


図 14 集光前後のビームプロファイル

a) 集光前 b)集光位置

集光スポットサイズは  $1/e^2$  で  $X=115.0\mu\text{m}$ ,  $Y=29.6\mu\text{m}$  であった。また、焦点位置は 45mm であり、集光前の 1100mA 時における LD パワーは 335mW であった。

### 5 . Cr:LiSAF 光の発振実験

上記の LD 光スポットサイズで、Cr:LiSAF を励起し発振実験を行った。その結果、最大 6mW の Cr:LiSAF 光の発振が得られた。その際のビームプロファイルを図 1 5 に、発振スペクトルを図 1 6 に示す。プロファイルは良好なガウシアン形状であり、中心波長は 888nm であった。また、結晶温度は 15 に設定してある。(現在の実験室温度 24 付近で、湿度は 20~30%なので、露点温度は 0~5 となり結露の心配は無いと考えられる。)

また、発振閾値および LD 光の吸収パワー(LD 光の電流値)と発振出力の関係を調査した。結果を図 1 7 に示す。発振閾値は吸収パワーが 147mW であった。

LD 光の結晶への吸収効率( Cr:LiSAF1.5%の吸収長さが 1.2mm および結晶の長さが 6mm なので、計算上 99.3%とした。

LD 励起時の発振に必要な励起光パワーを算出したところ、123mW と見積もられ、この数値が



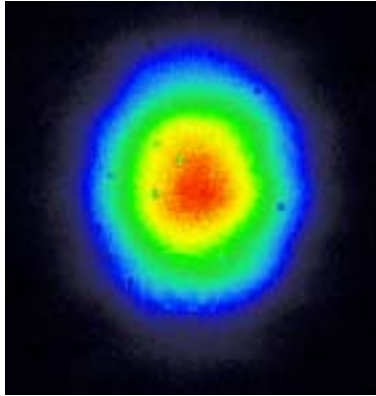


図 15 Cr:LiSAF 発振プロファイル

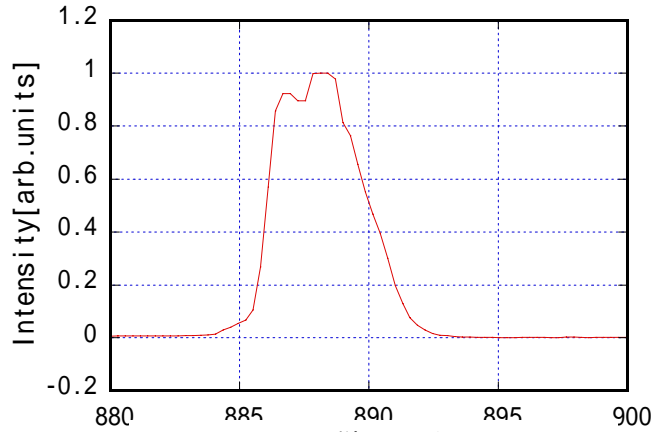


図 16 Cr:LiSAF 発振スペクトル

ら求まる図中のレーザー出力は

$$P_o = \left[ \left( \frac{h\nu_c}{h\nu_p} \right) \rho \left( \frac{e^{-ESA}}{e} \right) \left( \frac{T}{T+L} \right) \right] (P_{pa} - P_{th})$$

で求められる。計算値と実験値が異なる要因として、LDで励起しているため、ビームの重なり効率が低下していることが起因していると考えられる。

他の実験として、Cr:LiSAF結晶は、励起光により結晶温度が約 70 付近に達すると上準位寿命が 1/2 に減少し、小信号利得が減少するので、温度制御は重要な条件である。そこで、結晶の温度を現状より (16 ) 上下に変化させた場合の出力変化を調査したが、11~20 の範囲で変化させても出力の変化は見られなかった。また、現状の結晶での温度上昇をシンプルモデルで見積もった。

$$T = \frac{P_{abs}}{4} \left[ 1 + 2 \ln \left( \frac{w_c}{w_p} \right) \right]$$

$P_{abs}$  : 吸収パワー

: 熱伝導率

: 吸収係数

$w_p$  : 吸収パワーによって一様に

ヒートされたコア半径

$w_c$  : 固定温度で持続した結晶半径

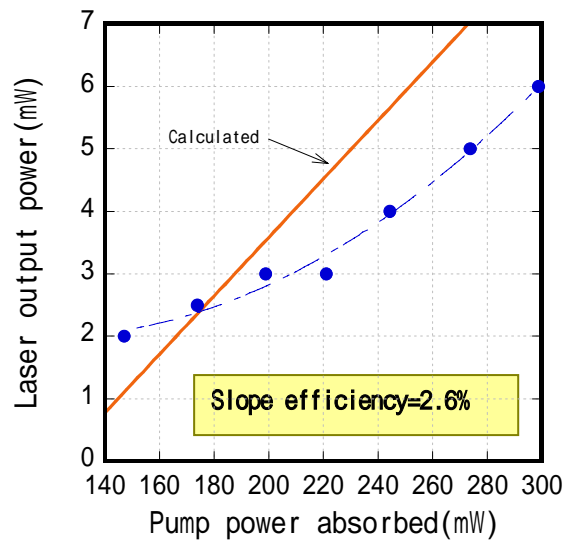


図 17 吸収パワーに対するレーザー出力

ここでは、最大吸収パワーが 298.7W なので、25.6 の温度上昇が見積もれ、重要温度 70 まで上昇していないことが分かる。

## 6. パルス動作の検討

実際に、過去の論文を検索してみれば、図18に示すような構成にて、わずか50mWの励起によりモード同期がなされたという報告がなされている。その際のモード同期のトリガー発生のためには、半導体多重量子井戸における非線形光学吸収特性（SESAM と呼ばれる）を用いている場合がある。Cr:LiSAF 結晶は中央フロリダ大学にて開発され、すでに10年ほどの研究がなされており、コンパクトなLD励起フェムト秒レーザー用の結晶として確認されている。しかしながら、実際の産業用の種光源としての性能まで至っていない。国内では、浜松ホトニクス株式会社にて、すでに30フェムト秒のパルスを達成しており、産業化のための基盤は育っている。

フェーズ II では、半導体過飽和吸収体 SESAM を浜松ホトニクス株式会社の協力により導入し、これによる非線形吸収によるモード同期を用いて、パルスレーザー発振を達成する。事前に、YAG-SHG を用いた通常のTi:S レーザーを用いて、SESAM の動作領域を確認し、それと同程度の共振器内エネルギーをCr:LiSAF にて達成することが不可欠で、これの達成の如何は、Cr:LiSAF 結晶の吸収・散乱特性に依存する。まずは、安定したモード同期の達成が先決である。

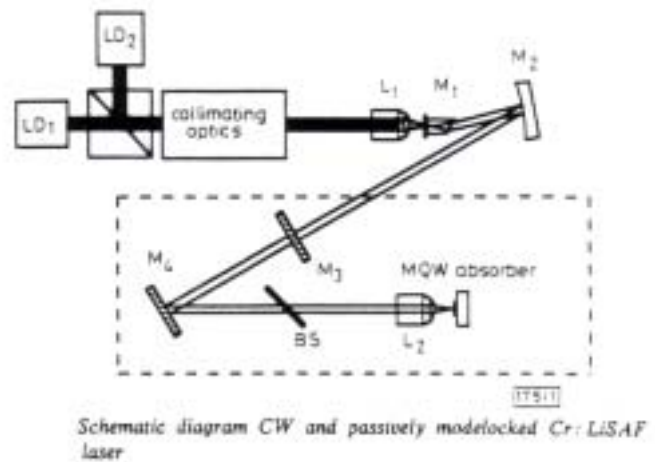


図18 モード同期レーザーの構成例

LD 直接励起 Cr:LiSAF 直線型共振器を構成することにより、Cr:LiSAF 発振を実現した。この共振器構成において、アウトプットカプラーの最適化を行うことによって、更なる出力の向上が期待できる。また、モード同期光を得るためには共振器構成を直線型から X 型および Z 型に変更する必要があり、その際の検討を行った。

### 6.1. X 型共振器構成の安定範囲

現在考えている X 型共振器構成を図19に示す。各光学部品の距離は、発振を容易にするため、 $M1-M2=100+$  mm,  $M2-M3=275$ mm,  $M1-M4=357$ mm で仮

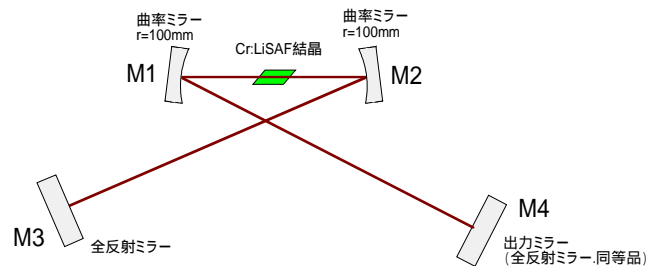


図19 光学配置

定し、現在の配置上、最短の共振器長となっている。

この寸法を元に安定領域の計算を行った。共振器両端のアーム距離が異なっているため、2つの安定領域が存在する。計算の結果、曲率ミラーの間隔が101~107mm および112~118mm 程度であれば発振が可能であることが分かった。(図20)

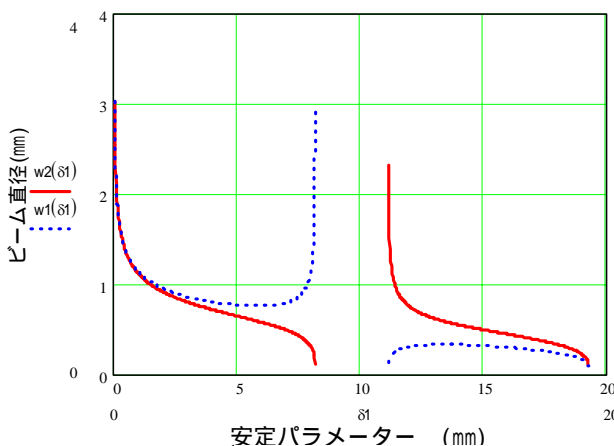


図20 安定領域

## 6.2 共振器のモードマッチング

現在の共振器構成におけるレーザーのキャビティモード直径は、 $66\mu\text{m}$  程度と見積もれる。それに対し、励起レーザーの最小スポット径は  $X:76.3\mu\text{m}, Y:116\mu\text{m}$  と共振モード直径より大きくなっており、マッチング効率の低下が懸念される。また、発振閾値を上げるためには、モード断面積を小さくしなければならない。以上のことより、励起レーザーから得られる最小スポット径を小さくすることが望ましいが、現状のLD から得られる最小スポット径は、簡易式  $d_{\min} = \sqrt{Lx}$  から、( $L$ =吸収長さ,  $x$ =LD のストライプ幅,  $x$ =発散角)  $X=19\mu\text{m}, Y=118\mu\text{m}$  と見積もれる。この結果、より小さいスポット径を得るには、ストライプ幅の狭いLD を用いるか、分散角の小さいLD を用いることが望ましい。また、Cr:LiSAF の結晶温度が励起光により  $70$  付近に達すると、上準位寿命が  $1/2$  に減少し小信号利得を減少させることもあり、(Upper-State Lifetime Quenching) 結晶長を大きくし、効率のよい冷却が必要となる。そのため、励起光のストライプ幅およびビーム発散角が大きい条件でタイトな集光をすると、ロッド端面でのビームサイズが大きくなってしまい、結晶の吸収長さとコンフォーカルパラメーターの不一致にともなう発振出力の低下が想定される。そういう意味でもストライプ幅の狭いLD が有用であると考えられる。

以上のような検討を進めた後に、実際に SESAM を用いたモード同期実験を行なうこととなった。図 21 に用いた構成例を示した。2 台の LD を用いて、Cr:LiSAF 結晶の両端面から励起し、X 型の共振器にて発振を達成し、裏面の反射ミラーのかわりに SESAM を配置することで、非線形吸収に伴うモード同期を達成した。

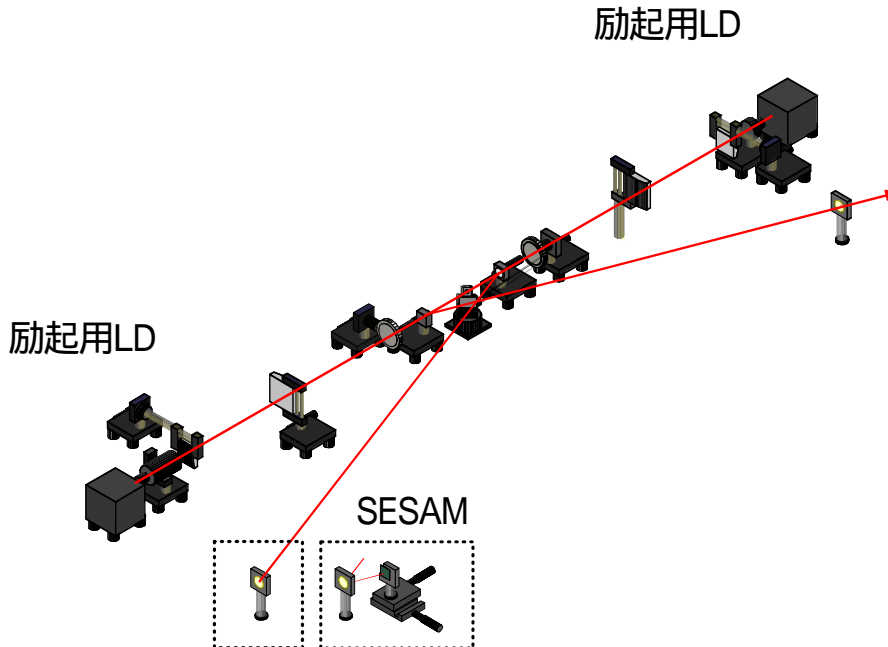


図 21 モード同期型の Cr:LiSAF の構成図例

励起用 LD のストライプ幅を検討し共振・励起モード間のマッチングを最適化させ、より高出力の CW 発振させた後、共振器内に SESAM を設置させることでパルス幅約  $1\text{ps}$ 、中心波長  $827\text{nm}$ 、スペクトル幅  $1\text{nm}$ 、周波数  $140\text{MHz}$  のモードロック発振まで確認している。その際の発振スペクトルを図

22に示した。このようにして、まずは、ピコ秒で動作させることが可能となった。

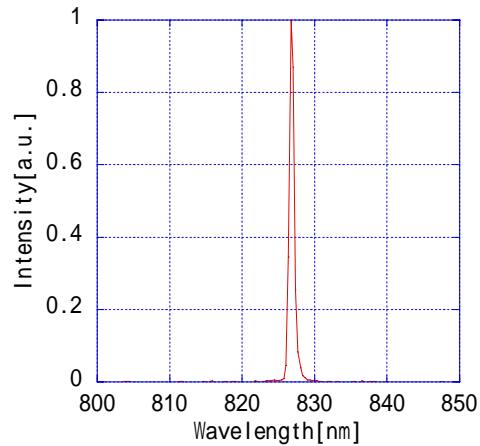


図 22 モード同期時のスペクトル

## 7. まとめと今後の課題

小型のLD直で励起できるフェムト秒レーザーは、本事業のTWレーザーの種パルス光発生における将来の基本素子であることは間違いがない。

本報告にて示したように、まずは、ピコ秒でモード同期することを確認できた。現時点で、スロープ効率が悪いのは、一つには用いたCr:LiSAFの結晶の純度がまだ不十分である可能性があることと、あとは、LDの励起密度をさらに高める必要があるという点での課題である。フェムト秒でのモード同期を行うためには、共振器内の光エネルギーを上昇させなくてはならない。そのためには、670nmのLDからの空間モードをTEM00に限りなく近づけることが不可欠である。現在のLDでは、その出力は十分であるが、その空間モードにまだ問題がある。さらに、SESAMI(半導体過飽和吸収体)と、共振器内の分散を補正する分散補正ミラーの最適化が必要である。これらを早急に導入し、コンパクト、高効率のフェムト秒種パルス発生系を構築したい。

そのような課題を乗り越え、最終的には、100~200mWの出力を達成した超小型フェムト秒レーザーができれば、科学産業分野には大変有効である。そのためには、この地域で670nmの中心波長での高輝度LDで、その空間モードのよいものを作製できるようになることが不可欠で、協力会社でのひとつである浜松ホトニクス株式会社では、今後もその検討を進める予定である。