

## 論文の内容の要旨

論文題目	<b>Kerr-lens mode locked lasers based on Yb<sup>3+</sup>-doped materials</b> (Yb添加媒質を用いたカーレンズモード同期レーザーの開発)
学位 申請者	戸倉川 正樹

Yb<sup>3+</sup>添加媒質を用いた超短パルスレーザー光源は他の超短パルスレーザー光源と比べて多くの利点を有する。Yb<sup>3+</sup>は市販の高出力InGaAs系レーザーダイオードによる直接励起が可能であり、容易に高出力励起光源が得られる。またYb<sup>3+</sup>イオンのレーザー動作は<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>と<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>準位のシュタルク分裂間でおこるため量子欠損が10%以下と非常に小さく、励起状態吸収やcross relaxation、concentration quenching等もほぼ存在しないため、1に近い量子効率を得ることができ、発熱の少ない高効率、高出力レーザー動作が可能となる。Yb<sup>3+</sup>添加媒質の分光特性や熱機械特性はその添加媒質によって強く影響を受けるために、現在までに多くのYb<sup>3+</sup>添加媒質が研究開発されており、最短パルス幅は共振器からの直接発生により59fs、外部での高次分散補償により47fsの報告がなされている。しかしながらそのような短パルスの発生は非常に広帯域な利得幅を持つ結晶に限られており、そのような結晶は熱特性や機械特性に欠点を有することが多く、高出力動作は制限されてしまう。さらに短パルスを得る為に、共振器の取り出し鏡の反射率を出力最適化条件の値よりも高くし、共振器全体のQ値を高めている事から高効率動作も難しく、一般的に出力は100mW以下で光光変換効率は5%以下と制限されていた。

本論文では高出力化が可能なYb<sup>3+</sup>添加媒質による超短パルスレーザー光源の開発を目標とし、条件として安価なLD直接励起のもと、熱特性、機械特性に優

れた一層の高出力化に対応できる利得媒質(主として $\text{Yb}^{3+}:\text{Re}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Re}=\text{Y,Lu,Sc}$ )を用い、サブ100fsレベルの $\text{Yb}^{3+}$ 添加超短パルスレーザー光源の開発を行った。

はじめにZ型の非点収差補正共振器を構築し、半導体可飽和体ミラー(SESAM)を用いたSESAMモード同期をおこなった。分散補償にはSF10プリズム対を用い、実験的にパルス幅が最短となる最適な分散補正長を選択した。5%取り出し鏡を用いたときパルス幅352fs、平均出力354mWを得ることに成功し、2%取り出し鏡を用いたときパルス幅188fs、平均出力220mWを得ることに成功した。このとき最短パルス幅はマルチパルス発振により制限され、また上述したように共振器の取り出し効率を低下させ共振器Q値を高める事により短いパルス幅が得られたが、その取り出し効率の低さから高い平均出力を得ることは困難となった。

上記問題を解決するため、カーレンズモード同期により深い変調を与えることにより、高い取り出し効率の共振器から短パルス光を得る事を可能とし、80fs以下のパルス幅で高効率に1W以上の平均出力を得ることに成功した。このとき連続発振状態において不安定条件に近くなるよう共振器を調整することにより、カーレンズ効果による利得変調効果が最大となるように調整した。さらに一層の短パルス化を進めるために異種の $\text{Yb}^{3+}$ 添加利得媒質を同一共振器内で用い、実行的な利得帯域幅を広げた複合利得媒質カーレンズモード同期超短パルスレーザーの開発を行い、53fsのパルス幅で1W以上の平均出力を得ることに成功した。上述の共振器内でのカーレンズ効果によるビーム系変化の計算を行いその影響を示し、また時間に依存しないという条件のもと利得媒質の帯域幅による短パルス化の限界と共振器内損失変化、およびビーム系変化との関係を計算した。今後の展望として、上記計算をもとに更なる高出力化についての考察をおこなった。本論文においてセラミック媒質が超短パルスレーザー光源においても利用可能であることの実証された。また単結晶媒質を用いても同様の短パルスを得ることに成功した。

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 戸倉川 正樹

審査委員主査 植田 憲一

委員 清水 和子

委員 桂川 正幸

委員 米田 仁紀

委員 武田 光夫

委員 渡邊 昌良

委員

序論では超短パルス固体レーザーの進歩の歴史を紹介し、科学研究に優れた性能を発揮するチタンサファイアレーザーは、固体レーザーの第2高調波で励起するレーザー励起レーザーであるため高効率動作が困難で、超短パルスの産業応用のためには、半導体レーザー励起Yb添加固体レーザーが必要なことを説いている。その上で、これまでのYb添加固体レーザー研究の問題点を解析し、平均出力1Wレベル、サブ100fsの高効率超短パルスを当初の研究目標に設定した。

第1章では、多数の縦モードの位相同期により超短パルスを発生させる基礎的なレーザー理論を紹介するとともに、高出力化のためのレーザー材料の必要条件、熱の発生、熱衝撃パラメータなどについて、機械的破壊強度の測定例を示しながら言及し、セラミックレーザー材料開発の必要性について述べた。

第2章では、超短パルスの発生機構としてSESAM方式とカーレンズモード同期を比較してその一長一短を検討した。自動的にモード同期発振が可能なSESAM方式に比べ、何らかのトリガが必要なカーレンズモード同期であるが、非線形屈折率 $n_2$ の大きなレーザー材料さえあれば、ソフトアパーチャー型のカーレンズモード同期が最も優れた方式であると方向付けた。

第3章では、高出力・超短パルスレーザー材料の開発について述べている。新たに開発したYb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などのSesquioxide結晶の特性を測定、評価を行い、従来の固体レーザー材料に比べて、量子効率、量子欠損、利得帯域幅、熱伝導係数などの点で、もっとも有望なLD励起レーザー材料であることを示した。いずれも2450℃以上の高い融点を持ち、良質な単結晶を育成することが困難であることから、1700℃で焼成可能なセラミック技術を応用して、優れた特性のセラミックレーザー材料を開発した。また、結晶でありながら、幅広いスペクトルを

可能にするDisorderd Crystalである $\text{Yb}(\text{YGd}_2)\text{Sc}_2(\text{GaAl}_2)\text{O}_{12}$ セラミックの開発にも成功した。

第4章では、カーレンズモード同期発振のための共振器デザインについて述べている。これまでカーレンズモード同期はビーム品質のよいレーザー励起で実現されており、産業用に必要な多モード発振LDバーによる実現は難しいとされていた。測定パラメータを用いながら、線状集光をするLDバー励起のために、意識的に非点収差を内包するキャビティデザインを採用し、励起体積、CWレーザー発振、超短パルスモード同期パルス発振に対応するキャビティモード体積の最適条件を計算し、実験条件設定に利用した。

第5章では、実際のモード同期レーザー実験について述べている。最初に行った $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ セラミックレーザーのSESAMモード同期の実験から、250fs、500mWという結果を得たが、これは単結晶で達成された特性と同等であった。同時に、これ以上の高出力を発生使用とすると、マルチパルスモード同期が発生して、SESAMモード同期の限界であることを解明した。そこで、新しいキャビティデザインに基づき、カーレンズモード同期に挑戦し、当初はSESAM併用、その後、純粋なカーレンズモード同期実験に成功した。後者では、92fs、850mWと、初めてサブ100fsパルスで1Wに肉薄する結果を実証した。同様の実験を $\text{Yb}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ についても実施し、おのこの65fs、68fsという超短パルスの発生に成功した。さらに構想を進めて、複数の利得帯域を組み合わせる超広帯域パルス増幅をめざすCombined Active Mediaによる発振実験を実施した。 $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3/\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ を組み合わせ、拡大された利得帯域から高効率にレーザーパワーを引き抜く工夫を行い、53fs@1W、66fs@1.5Wという従来実現できなかった高出力超短パルス発生に成功した。発生したモード同期パルスのスペクトル幅は27.3nmとレーザー材料のスペクトル幅に比べて2倍以上に拡大しており、従来のパルス幅限界を超えている。その他の材料についてもカーレンズモード同期発振が安定にかかった条件では、通常の利得帯域を超えたバンド幅で超短パルスが発生していることが確認され、新たな機構解明が必要となった。（関連論文[1, 2, 3, 4, 5]）

第6章では、ソフトアパーチャー・カーレンズモード同期の詳細な解析により、マルチパルスモード同期を抑制しながら、高出力化が可能なパラメータ追跡を行った。その結果、変調深さがキーであり、従来法であるSESAMに比べて、カーレンズモード同期では、10倍以上の深い変調が実現できた結果、超短パルス化と結合効率の最適化による高出力化の両立が初めて可能になったことがわかり、本研究が将来の高出力超短パルスレーザーのデザインツールとなることがわかった。

まとめでは、マルチパルス動作のために100mWレベルに制限されていた超短パルス固体レーザー技術を、本研究の成果によりワットレベルに向上させただけでなく、100Wレーザーのデザインも可能だと将来を展望している。

以上、本研究はYb添加材料におけるカーレンズモード同期技術を大きく発展させ、サブ100fsパルス幅の高出力、高効率のLD直接励起固体レーザーの開発に成功した研究に関するもので、産業応用という観点からも高く評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として、十分な価値を有するものと認める。