

固体光学デバイス研究ユニット

Solid-state Optical Science Research Unit

ユニットリーダー 和田 智之
WADA, Satoshi

ハワイの「すばる望遠鏡」の高度化、次世代半導体露光用EUV光源の実現、あるいはポストゲノム時代のメディカルフォトン分野でのブレイクスルー、分子生物学の分野における細胞内の物質の高速な移動に関する研究など、基礎科学、産業、医療、バイオテクノロジーの分野において「実用的な高性能コヒーレント光源」が切実に望まれている。本研究ユニットでは、これらの切実な要望にこたえることができる固体レーザーによる高性能光源を開発するために、基礎となる新しい固体レーザー結晶、非線形光学結晶を得るために結晶成長の段階から光学的特性、熱特性、レーザー特性と研究を展開している。これらマテリアルの研究に加え、光源に要求される、波長、パルス幅、出力、スペクトルの純度、安定性、空間コヒーレンスと高度な要求を満たすために、レーザー要素技術として、共振器設計技術、世界初の電子波長制御による波長制御技術、ディフォーダブルミラーといわれる形状可変鏡技術、これまでほとんど得られていない紫外線や中赤外線領域や微弱光を変換可能な非線形波長変換法技術の研究にも取り組む。

1. 新固体光学材料の創製に関する研究

(1) Yb添加1mmレーザー結晶の開発 (和田, 小川*2, 浦田*4, 武*4)

近年、1mmレーザーはバイオやナノテクなど、理科学研究の分野から生活に身近なものまで、非常に幅広い用途で利用されている。その中でも半導体レーザーで励起できる固体レーザーは小型で取り扱いが容易なため、急速に普及が進んでいる。しかしながら、用途の多様化に伴い、より幅広い波長・時間領域をカバーし、高効率で、安定性の高いレーザーが求められているのが現状である。そのためには、エレクトロニクスや制御技術も大切であるが、新しい光学材料の開発が不可欠である。本研究は昨年度に引き続き、1mmのなかでも、超短パルス光発生可能なYb³⁺添加バナデート結晶の育成とその光学的・熱的特性評価を行った。Yb:YVO₄, Yb:GdVO₄, Yb:LuVO₄の三種の結晶について、光学特性を常温で測定したところ、980nm付近に非常に大きな吸収があることが確かめられた。また、蛍光の線幅は985nmを中心に約50nmとYb:YAGの数倍広く、100fs以下の超短パルス発生が期待できることがわかった。また、これらの結晶の熱拡散率、比熱などの測定を行い、熱伝導率の評価を行った。その結果、Yb:YAGとほぼ同等の熱特性を有することが確かめられた。以上の結果より、Yb³⁺添加バナデート結晶は従来結晶に匹敵する優れた光・熱特性を有し、有力な長短パルスレーザー用結晶と言える。来年度以降も引き続き超短パルスレーザー発振の実現を目指す。

(2) 超短パルスレーザーを指向したNd:Ca₉La(VO₄)₇単結晶の開発 (和田, 小川*2, 浦田*4)

超短パルス光を得るための新しいアプローチとして、Nd³⁺を活性イオンとしたレーザー結晶の開発を開始した。現在実用化されているTi:Al₂O₃によるフェムト秒オーダーの超短パルスレーザーは励起源として半導体レーザー(LD)を用いることができない。またLD励起超短パルスレーザーの活性中心としてはYb³⁺が第一候補として研究されてきたが、準3準位で動作するため発振が難しい。これに対しNd³⁺は4準位で動作するため発振が容易であるが、既存のNd³⁺ドープ結晶ではスペクトル幅が狭く、フェムト秒オーダーの超短パルス発振は不可能である。本研究では、Nd³⁺に対して比較的大きいサイトを提供できるCa₉La(VO₄)₇に注目して、これにNd³⁺を添加した結晶の育成を試み、その分光学的性質を評価した。得られた結晶について、偏光顕微鏡観察による品質の評価をおこなうとともに吸収および発光スペクトルを調べた。その結果、インクルージョンをほとんど含まない結晶を得ることができた。結晶周辺部には強い歪みが観察されたが、中央部は比較的良好であった。また1040-1100 nmにかけて非常にブロードな発光が観察され、その半値幅は約17 nmであり、Ndドープバナデイト結晶のそれに比べて一桁ほど大きい。また800 nm帯の吸収係数も約22 cm⁻¹と十分大きくかつブロードであった。以上より、Nd:Ca₉La(VO₄)₇はLD励起超短パルス固体レーザー材料として期待できる結果が得られた。今後も結晶の品質改善を行うとともに、レーザー発振特性の評価を行う予定である。

2. 高性能固体レーザー光源の開発

(1) 非線形光学を用いた高性能可視コヒーレント光源の開発 (和田, 斎藤*1, 赤川*4, 高沢*4, 加藤*4)

非線形周波数変換法は、さまざまな科学的な計測を行う上で必要となるコヒーレント光源を実現する上で重要な役割を担っている。我々のユニットでは、すばる望遠鏡のレーザーガイド補償光学方式を実現するための疑似連続波動作のコヒーレント589 nm光源をはじめ、極圏の温度の高度分布を計測するためのライダー用パルス動作型589 nm光源等、非線形周波数変換を基礎とした環境モニター用コヒーレント光源の原理的研究を行っている。シングル縦モード、繰り返し速度<1 kHz、平均出力4 W、パルス幅40 nsのライダー用パルス動作型589 nm光源の設計を進めた。また、ブロードバンドレーザーの新しい高効率周波数変換法の原理的研究にも取り組んだ。次世代のコヒーレント光源の候補の1つであるファイバーレーザーは、その利得の高さから、注入同期やファイバー媒質中にブラッググレーティングを施すことなしには、狭線スペクトルで発振させることができない。非線形光学結晶として、周期分極型MgO添加LiTaO₃(PPMgO:LT)を用いて、分散された波長成分が、すべてPPMgO:LTの疑似位相整合条件を満たす角度で入射される能動的分散入射系を設計した。スペクトル幅5 nm、パルス幅3 ns、繰り返し速度100 kHz、平均出力430 mWの入力に対して、約10%の変換効率が得られた。この時、入力が増大に伴い、2次関数的に出力が増大した。すなわち狭線スペクトルのレーザーを用いた場合と同じレベルの周波数変換が実現した。また、従来の周期分極反転型結晶である周期分極型MgO添加LiNbO₃による周波数変換においては、10 MW/cm²以上の入射光強度に対して、フォトリフラクティブ効果が生じ、第2高調波の出力が著しく低下するのに対して、PPMgO:LTを用いた場合では、同レベルの入射強度では、フォトリフラクティブ効果が生じないことが明らかになった。

(2) Yb:YAG 再生増幅器を用いた高出力超短パルスレーザーの開発 (和田, 小川*2, 赤川*4, 高沢*4, 小泉*4, 房*4, 小山*4)

超短パルスレーザーは非熱加工と言われる熱の影響がない微細な加工や時間分解の高い計測が可能となるために、次世代の加工、計測用レーザーとして世界的に注目を集めている。しかし、実用的なレーザー結晶およびその利用技術が確立されていないため、産業界には未だ普及されていない。我々は、超短パルス光発生のための新レーザー結晶の育成を行うとともに、セラミック結晶を利用した超短パルスレーザーの開発を行っている。本年度は、Yb:YAGセラミックレーザー発振器の開発及び、再生増幅器を用いた高出力・超短パルスレーザーの開発を行った。発振器の開発は、発振波長を利得の最も高い1030 nmに設定し、最大出力6.4 W、スロープ効率75%、発振効率25%を達成した。このスロープ効率は、水による強制冷却を使用しないシステムとしては、世界的に見ても高い値が得られている。またYb:YAGセラミック結晶を用いた再生増幅器を構築し、1 WのYb:YAGレーザー発振器と組み合わせ、10 W、1 psの高出力・超短パルスレーザーの試作に成功した。このレーザーを用いた加工システムの試作も行っており、この成果は2月5日にプレスリリースされた。

3. コヒーレント光を用いた応用研究

(1) 中赤外高速波長可変レーザーの分光応用 (和田、斎藤*1、小川*2、湯本*3、前田*5)

中赤外線領域は分子の振動や回転に基づくエネルギー準位が多数存在することから指紋領域とも呼ばれている。そのためコンピューター制御により、自在に高速波長掃引可能な光源は、特に分光学分野で非常に重要な光源となり、さらには高速波長掃引から赤外線検出にいたるまでオートメーション化した分光システム基盤の構築は、医療、生物分野においても重要なツールとなりうる。これまでに、2波長同時発振が可能なTi:sapphireレーザーと非線形波長変換を組み合わせることで、およそ5 mmから12 mmの中赤外線領域で高速波長掃引可能な中赤外高速波長可変レーザーの構築を行ってきた。本年度は、中赤外高速波長可変レーザーの波長安定性が±10⁻³ mm以下であることを見出し中赤外分光計測へ展開可能である波長可変光源であることを実証した。さらに中赤外線の高波長掃引に対する赤外線検出のオートメーション化を図り、FT-IRと十分に比較出来る程良好なスペクトルデータを得ることが可能な中赤外分光システム基盤の構築に成功した。今後、これまでに構築した中赤外分光システムを用いて、生化学、医療応用分野への展開を考慮した生体サンプル等の分光計測へ着手する予定である。またさらに中赤外分光システム基盤を顕微分光測定や非線形分光測定と融合しさらなる光源の高度化も検討している。

(2) ⁸⁷Rb原子のレーザー冷却およびボーズ・アインシュタイン凝縮体の生成 (和田、吉田*1)

これまでRb中性原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体を作製する準備を行って来た。これまでにボーズ・アインシュタイン凝縮体を作製する準備段階として、レーザーと⁸⁷Rb超微細構造への安定化装置の構成をおこなった。レーザートラッピングのために出力1 WのMOPA (master oscillator power amplifier)半導体レーザーと出力50 mWのLittman-Metcalf型外部共振器型半導体レーザーを用意し、これらを⁸⁷Rb原子の5S_{1/2}F=2→5P_{3/2}F=3及び5S_{1/2}F=1→5P_{3/2}F=2の遷移線に安定化させた。この時MOPAレーザーについてはシーダーとして用いている外部共振器型半導体レーザーのビームを一部サンプリングし、このビームを用いて安定化を行った。これにより変調信号は取り出したビームのみに加え、トラッピングビームに対して重ね合わせずに済んだ。トラッピング圧力を生み出すMOPAレーザーについてはF=3の遷移状態からおおよそ15 MHz程度赤方偏移させる必要があるため、音響光学素子(AOM)を用いてこれを実現させた。リポンプ用レーザーは直接原子遷移に安定化させた。また、これらの原子遷移検出には飽和分光法を用いており、常温で超微細構造に生じる数GHz程度のドップラー広がりを排除し、数MHzしかない遷移準位に安定的に周波数ロックをかけている。周波数ピークを検出するために10-100 kHzの周波数変調信号をAOMや駆動電流に重ね合わせ、これを分光信号からロックインアンプによって復調する事で極値点を微分信号のゼロ点として検出し、これを外部共振器の周波数を決めているグレーティング駆動用ピエゾ素子にフィードバックをかけて周波数安定化を行った。また⁸⁷Rb原子のレーザー捕捉用の真空装置を修理した。真空チャンバーは設計後購入したもののだが、多数の箇所からの漏れがあり、ガasket交換やリークバルブの取り外し、漏れの見つかったチタンサブリークポンプも完全交換など多少の仕様変更をし、250℃のベーキングを数週間行う事によって、多くの時間を要したが、真空度は1.4×10⁻⁹ Paの極高真空に達した。現在の真空度は安定的に推移している。

*1 協力研究員, *2協力技術員, *3ジュニアリサーチアソシエイト, *4客員研究員, *5研修生

The optical science of the solid state materials is investigated for development of new coherent light sources, nonlinear wave-conversion techniques and photonics devices. New solid state laser materials and new laser technologies with the LD pumping and computer programmed electronically wavelength tuned method realize practical ultra-short pulse lasers and broadly tunable light sources from EUV to THz region. We believe that new light sources would be developed in our lab. to give a breakthrough in the biotechnology, nano-science, medical applications, industrial applications and so on.

1. Research on creation of new solid-state optical materials

(1) Development of 1-micron laser crystals

Ultra short pulse lasers are progressing toward practical use in various applications such as industrial fabrications, industrial diagnostic, medical treatment and so on. Especially, Yb-doped laser crystals attract much attention as a laser medium for direct-LD-pumped ultra short pulse lasers. Recently, vanadate crystals are expected as host crystals of Yb since the emission cross section of them is larger than that of the Yb:YAG crystal, which is conventionally used for ultra short pulse generation. The quantum defects are also smaller than that of Nd-doped crystals. In our previous work, we grew the Yb-doped YVO_4 , GdVO_4 and LuVO_4 by the floating zone (FZ) method successfully. In this work, we measured the optical and thermal properties of these crystals at room temperature. As the results, these crystals had large absorption near 980nm. The commercial laser-diode can be used for pumping the crystals at the wavelength near 980nm. In addition, the wide fluorescence spectrum of 50nm was observed around 985nm. In addition, thermal conductivities of these crystals were measured by the Temperature wave analysis. Thermal properties of Yb-doped vanadates were as same as conventional Yb:YAG crystal. From these results, Yb-doped vanadates have potential for new laser material for ultra short pulse lasers.

(2) Development of the Nd:Ca₉La(VO₄)₇ crystal for LD pumped ultra short pulse laser

We investigated new laser crystals based on Nd-doping crystals for ultra-short pulse generation. For ultra short pulse generation, Ti:sapphire is used widely because wide spectrum decided by the time-spectrum product is obtained. However, since absorption spectrum exists in the blue-green region, LD pumping is not allowed. Therefore, efficiency from electrical power to light is very low. On the other hand, instead of Ti:sapphire, recently, Yb doped crystals attract much attention, because of possibility of efficient LD-pumping. However, laser transition to near ground state prevent from efficient short pulse generation. Nd laser is the most popular solid-state laser because of 4-level laser action and efficiency. Problems for ultra-short pulse generation are narrower spectral width less than 2 nm. In this research, we introduce new host material such as $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ for expand of the bandwidth of laser. We successfully grow the material without micro inclusion in the crystal and observed fluorescence spectrum, which is more than 17 nm in the wavelength region from 1040 to 1070nm. Observed band width is enough for ultra-short pulse generation. Absorption coefficient at 800 nm reaches to 22 cm^{-1} . The optical property shows Nd:Ca₉La(VO₄)₇ is one of good candidates for new laser material for ultra-short pulse generation.

2. Development of high-performance coherent light source based on the solid-state laser material

(1) Development of all-solid-state coherent 589 nm light source

Nonlinear frequency conversion is widely needed to realize coherent light sources required in scientific measurements and observations. We realized the quasi-continuous-wave coherent 589 nm light source for the realization of laser guide star adaptive optics in the Subaru telescope and we proceeded a principle research concerning a pulsed 589 nm coherent light source for measurement of temperature in the polar circle using a sodium lidar system. The coherent light source will be achieved with a single longitudinal mode, a repetition rate of $< 1 \text{ kHz}$, an average output power of 4 W, and a pulse width of 40 ns. We also carried out the principle research on high-efficient second harmonic generation of a broad band laser. Although fiber laser is a candidate in the next generation, its output spectrum is broadly spread without controls by injection seeding and fiber Bragg grating. An system for active dispersion non-tracking frequency conversion, which satisfies quasi-phase matching for the whole range of the broad band, was designed using periodically poled MgO-doped LiTaO₃ (PPMgO:LT) as a nonlinear optical crystal. In the design, a conversion efficiency of approximately 10 % was achieved using a fiber laser of an average input power of 430 nm with a wide spectral width of 5 nm, a duration of 3 ns, and a repetition rate of 100 kHz. The output power of second harmonic wave increased in proportion to the square of the input power. The conversion efficiency using the broad band laser is a level with that using a narrow band laser. In the case of frequency conversion using periodically poled MgO-doped LiNbO₃ crystal, we observed photorefractive effect for an input intensity over 10 MW/cm^2 and it dropped output power of second harmonic wave. We demonstrated that photorefractive effect can be avoided with the same input intensity using the PPMgO:LT.

(2) Development of high power ultra short pulse laser by using the regenerative amplifier

High intensity radiation with ultra short pulse width realized the material fabrication without thermal distortion, ultra-first time resolve measurement. Therefore, amplifier for ultra short pulse laser is of importance for industrial applications. However, since practical laser crystal and technology are still in the research stage.

In this year, we grew the laser material for practical amplifier of ultra short pulse laser, and development of a oscillator and a regenerative amplifier with ceramic Yb:YAG crystals. At the present, we obtained 6.4W output power at 1030 nm, 75% of Slop efficiency, and 50% of light-light conversion efficiency. On the other hand, for the amplifier, we realized 10 W of output power with 1 ps pulse width and 100 kHz Repetition rate. Pulse energy reach to 100 J. The laser system has applied to material fabrication system.

3. Applied research by using the coherent light

(1) Mid-infrared laser

Many molecules have many absorption lines in mid-infrared region based on vibrational and rotational transitions. Therefore the mid-infrared region is called "fingerprinted region" of molecules. Rapid and random wavelength tuned mid-infrared laser can be controlled by PC is so importance for laser spectroscopy. Furthermore the development of the spectroscopy automation system can tune and detect mid-infrared wavelength is so importance for biochemistry and medical science. Before now we have realized the rapid and random wavelength tuned mid-infrared laser by using dual-wavelength oscillation in an electronically tuned Ti:sapphire laser with nonlinear wavelength conversion. The tunable mid-infrared laser was achieved wide tuning range from 5 μm to 12 μm . In this year we found the wavelength stability of the mid-infrared wavelength was less than $\pm 1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$. We substantiated that the tunable mid-infrared laser can be applied for the mid-infrared spectroscopy. Furthermore we realized the mid-infrared spectroscopy automation system. And we obtained good spectral data so as to be able to compare it with FT-IR by using our spectroscopy automation system. We are advancing the preparation for a spectrum measurement of the living body sample etc. considering the application to biochemistry and the medical treatment now. Also, in the next year, we will continue to the spectrum measurement in the mid-IR region for the living body samples and demonstrate the advancement of our spectroscopy automation system together with nonlinear-optical spectroscopy and infrared microspectrometry.

(2) Toward generation of a Bose-Einstein condensate

Efforts were devoted to generate a Bose-Einstein condensate of the ^{87}Rb atom. The laser system was regulated in order to stabilize the laser frequency to the ^{87}Rb hyperfine splitting transitions. The laser system consisted of the trapping laser and the repump laser. The trapping laser is a 1W MOPA (master oscillator power amplifier) laser with semiconductor external cavity diode laser (ECDL) as a seeder, and the repumping laser is a 50 mW semiconductor ECDL. Those laser frequencies are locked to the ^{87}Rb $5S_{1/2}F=2$ to $5P_{3/2}F'=3$ and $5S_{1/2}F=1$ to $5P_{3/2}F'=2$ transitions, respectively. A 1/3 fraction of the output of the seeding ECDL laser of the MOPA was picked up for the stabilization system. The sampled beam was frequency modulated, and the trapping beam was not done directly, which treatment did not alter the output spectrum. The trapping beam was red-shifted by roughly 15 MHz from the center of the hyperfine resonance point by using an acousto-optic modulator (AOM). The repumping laser was directly modulated and locked to the atomic transition by using the current modulation. For these lasers the saturated absorption spectroscopy was adopted to measure the atomic transitions in the ^{87}Rb gas cell. In the room temperature the line width of atomic hyperfine transitions, several MHz, are broadened by the Doppler effect of flying atoms, which prevent the measurement of the true line width at atomic rest frame. The saturated absorption spectroscopy clarifies the true line width. The modulation frequency was 10-100 kHz, and is superposed to the AOM and laser driving current. The signal of the saturated absorption spectroscopy was extracted by demodulating the output of the photo-detection signal by using a lock-in amplifier. This signal represents the differential of the hyperfine spectrum, and the zeros of the differential signal correspond to the absorption peak of the hyperfine structure. The laser frequency feedback circuit was realized by superposing this differential signal to the control voltage of the Piezo electric transducer of the laser frequency control grating. The vacuum system was also improved for the trapping chamber of the ^{87}Rb atom. The chamber was designed and purchased as an assembled one. There were many deficits to prevent from obtaining an ultra-high vacuum. Several change of the chamber and the final 250 degree bake out enabled to reach to the ultra-high vacuum of 1.4×10^{-9} Pa. At present the vacuum is stable and is keeping this low pressure.

Staff

Head

Dr. Satoshi WADA

Members

*¹ Dr. Norihito SAITO

*¹ Dr. Yusuke YOSHIDA

*² Ms. Takayo OGAWA

*³ Mr. Masaki YUMOTO (Tokyo Univ. Sci.)

*¹ Contract Researcher *² Contract Technical Researcher *³ Junior Research Associate

in collaboration with

Visiting Members

Mr. Kazuyuki AKAGAWA (Megaopto Co., Ltd.)

Dr. Xiaojun FANG (SIGMA KOKI Co., Ltd.)

Dr. Hidekazu HATANAKA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Yutaka HAYANO (National Astronomical Observatory of Japan)
Dr. Jun INOUE (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Toshihiko IMURA (SAITEC)
Mr. Tatsuya ISHIZUKA (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Koichi IYAMA (Hamamatsu Photonics K.K.)
Dr. Yoshinori KATO (Hamamatsu Photonics K.K.)
Ms. Mayumi KATO (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Takuya KAWAHARA (Shinshu Univ.)
Dr. Toshirou KOIZUMI (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Yasushi KOJIMA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Toshimasa KOSEKI (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Shigenori KOYAMA (SIGMA KOKI Co., Ltd.)
Dr. Mingyi LING (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Oleg LOUCHEV (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Hiroki MORIWAKI (Sumitomo Electric Industry. Ltd.)
Mr. Takeshi MANABE (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Masayuki MARUYAMA (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Masataka MORITA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Shinki NAKAMURA (Ibaraki Univ.)
Dr. Kentaro NISHIGORI (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Minoru NISHIHATA (Hamamatsu Photonics K.K.)
Dr. Kohki NODA (Wakayama Univ.)
Dr. Yoshihiko SAITO (National Astronomical Observatory of Japan)
Mr. Takamitsu SAKAI (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Michio SAKASHITA (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Naoyuki SEKO (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Tatsuya SHINOZAKI (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Hiroyuki SUZUKI (SAITEC)
Dr. Akira TAKAZAWA (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Hiroshi TANAKA (Megaopto Co., Ltd.)
Mr. Tomohiro TSUKIHANA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Yoshiharu URATA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. Yoshio WADA (Megaopto Co., Ltd.)
Dr. You WANG (Hamamatsu Photonics K.K.)
Dr. Anhua WU (Chinese Academy of Science)

Trainees

Mr. Koichi INOUE (Tokyo Univ. Sci.)
Mr. Yasuhiro MAEDA (Tokyo Univ. Sci.)