

## 3-9 研究施設

### 分子制御レーザー開発研究センター

佐藤 信一郎 (助教授)\*)

A-1) 専門領域：レーザー分光学、光化学

A-2) 研究課題：

- a) 巨大超高リユードベリ分子の緩和ダイナミクス
- b) ファンデルワールス錯体カチオン内の分子間相互作用
- c) 位相・波形の制御された極短パルス光源の開発と化学反応制御への応用

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) 気相・分子線中の分子をイオン化ポテンシャルより僅かに低エネルギー側(数 $\text{cm}^{-1}$ )にレーザー光励起すると、主量子数( $n$ )の非常に大きい( $n > 100$ )超高リユードベリ状態を比較的安定に生成することが出来る。この状態にある分子は非常に大きな電子軌道半径(サブ $\mu\text{m}$ )を持ち、巨大超高リユードベリ分子と呼ばれ、理論・実験の両面から研究が進められている。通常、分子は電子の動きにくらべ核の動きが遅い、いわゆるボルンオッペンハイマー近似が成り立っているが、巨大超高リユードベリ分子においては、電子の周回運動のほうが核の運動より遅い逆ボルンオッペンハイマー近似が成り立つと予想され、通常とは全く異なる振動回転-電子相互作用が期待される。これらの相互作用は分子サイズ(回転)や振動回転相互作用の大きさ等により変化すると考えられるが、簡単な2原子分子と多原子分子(ベンゼン等)では、明らかに多原子分子において振動回転-電子相互作用によるリユードベリ系列間遷移が顕著に起きることをみいだした。
- b) 分子間力の研究手段として、超音速ジェット中に生成するクラスター分子を研究対象とすることはもはや定番となりつつあるが、我々はZEKE光電子分光法の特長を生かして、中性-カチオン間の分子間力の変化に着目して研究している。中性芳香族-希ガスvdW錯体では主たる分子間力は分散力であり、イオン化すると電荷-電荷誘起双極子(CCID)相互作用が新たに加わる。ZEKE光電子分光法によりCCID相互作用のエネルギーや、分子間振動、ジオメトリー変化、立体障害の影響等について新たな知見が得られている。
- c) 光解離や光異性化等の光化学反応において、光励起された波束は、個々の反応座標のポテンシャル局面によって決まる量子準位に即した運動をする。同一波長の極短パルス光による多光子励起では、この波束の運動を反応生成物の基底状態へむけて最適に誘導することは出来ない。最適に誘導するためには、ポテンシャルの非調和性に即した多波長の極短パルス列を、波束の時間発展に合致したタイミングで用意しなければならない。このための位相・波形の制御されたレーザー光源の開発を進めている段階である。即ち、チタンサファイアレーザーの出力をグレーティングペアとコンピューター制御された液晶空間マスクにより波形加工し再生増幅により多光子励起に十分な出力を得た後、OPG・Aにより波長変換するシステムである。

B-1) 学術論文

**H. INOUE, S. SATO and K. KIMURA**, “Observation of van der Waals Vibrations in Zero Kinetic energy(ZEKE) Photoelectron Spectra of Toluene-Ar van der Waals Complex,” *J. Electron Spectrosc.* **88-91**, 125 (1998).

**H. SHINOHARA, S. SATO and K. KIMURA**, “Zero Kinetic Energy (ZEKE) Photoelectron Study of the Benzen-N<sub>2</sub> and Fluorobenzene-N<sub>2</sub> van der Waals Complexes,” *J. Electron Spectrosc.* **88-91**, 131 (1998).

**S. SATO, K. IKEDA and K. KIMURA**, “ZEKE Photoelectron Spectroscopy and Ab Initio Force-Field Calculation of 1,2,4,5-Tetrafluorobenzene,” *J. Electron Spectrosc.* **88-91**, 137 (1998).

**T. VONDRAK, S. SATO and K. KIMURA**, “Cation Vibrational Spectra of Indole and Indole-Argon van der Waals Complex. A Zero Kinetic Energy Photoelectron Study,” *J. Phys. Chem. A* **101**, 2384 (1997).

**S. SATO and K. KIMURA**, “One- and Two-Pulsed Field Ionization Spectra of NO. High-Lying Rydberg States near Ionization Threshold,” *J. Chem. Phys.* **107**, 3376 (1997).

**H. SHINOHARA, S. SATO and K. KIMURA**, “Zero Kinetic Energy (ZEKE) Photoelectron Study of Fluorobenzene-Argon van der Waals Complexes,” *J. Phys. Chem. A* **101**, 6736 (1997).

C) 研究活動の課題と展望

フェムト・ピコ秒レーザーシステムの導入立ち上げにともない、極短パルスの波形制御技術の開発と化学反応制御の研究に研究室の力点を置いていきたい。また巨大超高リユードベリ分子についても、これまでナノ秒レーザーとパルス電場検出の組み合わせで研究してきたが、これからはフェムト・ピコ秒レーザーと光誘起リユードベリイオン化検出の組み合わせで、より早い時間領域でのダイナミクスに迫っていきたい。

\* 2000年4月1日北海道大学大学院工学研究科助教授

## 猿 倉 信 彦 (助教授)

### A-1) 専門領域：量子エレクトロニクス、非線形光学

### A-2) 研究課題

- a) 遠赤外超短パルスレーザー
- b) 紫外波長可変固体レーザー
- c) 非線形光学
- d) 青色半導体レーザー
- e) 超高速分光
- f) 新真空紫外域光学窓材

### A-3) 研究活動の概要と主な成果

- a) 遠赤外超短パルスレーザー:今までレーザーが存在していなかった遠赤外領域において、世界で初めて、強磁場を印加した半導体から、平均出力がサブミリワットの遠赤外放射(テラヘルツ放射)を得ることに成功した。このテラヘルツ放射の偏光が、磁場によって大きく変化することも発見した。また、昨年度にテラヘルツ放射の実験に用いた半導体非線形ミラーに磁場を印加することにより、テラヘルツ放射の増強を実現した。この領域は分子物質のフォノンやエキシトンを直接励起できることができるため非常に重要であるだけでなく、工業的応用においてもイメージングやセンシングなどの新たな手法となるため、世界的にも大いに注目されている。
- b) 紫外波長可変固体レーザー:紫外、および深紫外波長領域において、世界で初めて全固体、かつコンパクトな10 mJクラスの出力を持つ波長可変紫外超短パルスレーザーを実現した。この紫外、深紫外波長領域は様々な分子物質の分子科学の研究、特にオゾン層問題の研究や青色半導体レーザーの研究において必要不可欠と考えられる波長領域である。
- c) 非線形光学:半導体において、レーザー照射による遠赤外複素屈折率の変化を測定した。
- d) 青色半導体レーザー:青色で発光する窒化ガリウム系の半導体素子において精密な分光を行い、未解明の分野である発光メカニズムについて様々な知見を得た。窒化ガリウム系の半導体素子は、近年、青色半導体レーザー材料として急速に注目されてきている物質である。青色半導体レーザーにおいては、室温連続発振青紫色レーザーダイオードの寿命が1万時間を超えて製品化が間近になっているにもかかわらずその発振機構の解明には至っておらず、原点に戻って、InGaN系発光ダイオードの発光機構について、研究を進める予定である。
- e) 超高速分光:a)で述べたような強力な遠赤外放射光を用いて、様々な分子物質の超高速過渡分光を行う。現在、化合物半導体であるInAsにおいて、清浄表面からのテラヘルツ電磁波放射の研究を、総合研究大学院大学光先端学科松本教授と行っており、表面とテラヘルツ電磁波に関連する多くの情報を得ている。また、神戸大学富永助教授、千葉大学西川教授と溶液、及び期待に関する超高速遠赤外分光の実験を行っており、成果をあげている。
- f) 新真空紫外域光学窓材:紫外、および深紫外波長領域におけるレーザー結晶に関するノウハウを用いて、放射光に用いることが可能な新しい真空紫外領域の窓材の研究を課題研究として行っており、いくつかの新結晶の開発に成功している。

B-1) 学術論文

- H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU, T. TSUKAMOTO and N. SARUKURA**, “Saturation of THz-radiation power from femtosecond-laser-irradiated InAs in a high magnetic field,” *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1398 (2000).
- Z. LIU, H. MURAKAMI, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High-gain reflection-double pass, Ti:sapphire continuous-wave amplifier delivering 5.77 W average power, 82 MHz repetitionrate, femtosecond pulses,” *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3182 (2000).
- H. OHTA, K. KAWAMURA, M. ORITA, M. HIRANO, N. SARUKURA and H. HOSONO**, “Current injection emiddion from atransparent p-n junction composed of *p*-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/*n*-ZnO,” *Appl. Phys. Lett.* **77**, 475 (2000).
- S. ONO, T. TSUKAMOTO, M. SAKAI, Z. LIU, H. OHTAKE, N. SARUKURA, S. NISHIZAWA, A. NAKANISHI and M. YOSHIDA**, “Compact THz-radiation source consisting of a bulk semiconductor, a mode-locked fiber laser, and a 2 T permanent magnet,” *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 554 (2000).
- K. SAITOH, K. NISHIKAWA, H. OHTAKE, N. SARUKURA, H. MIYAGI, Y. SHIMOKAWA, H. MATSUO and K. TOMINAGA**, “Supercritical-fluid cell with device of variable optical path length giving fringe-free terahertz spectra,” *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 4061 (2000).
- Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, N. MUJILATU, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Direct Generation of 27-mJ, 309-nm Pulses from a Ce<sup>3+</sup>:LiLuF<sub>4</sub> Oscillator Using a Large-Size Ce<sup>3+</sup>:LiLuF<sub>4</sub> Crystal,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L88 (2000).
- Z. LIU, S. ONO, H. OHTAKE, N. SARUKURA, T. A. LIU, K. F. HUANG, and C. L. PAN**, “Efficient Terahertz Radiation Generation from a Bulk InAs Mirror as an Intracavity Terahertz Radiation Emitter,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L366 (2000).
- Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High-pulse-energy ultraviolet Ce:LiCAF laser oscillator with newly designed pumping schemes,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L466 (2000).
- K. KAWAMURA, N. SARUKURA, M. HIRANO and H. HOSONO**, “Holographic Encoding of Permanent Gratings Embdded in Diamond by Two Beam Interference of a Single Femtosecond Near-Infrared Laser Pulse,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L767 (2000).
- H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU, T. TSUKAMOTO and N. SARUKURA**, “Intense THz radiation from femtosecond laser pulses irradiated InAs in a strong magnetic field,” *J. Lumin.* **87-89**, 902 (2000).
- H. OHTAKE, S. ONO, E. KAWAHATA, T. KOZEKI, H. MURAKAMI, Z. LIU and N. SARUKURA**, “Development of Intense and Compact THz-radiation source using femtosecond-laser irradiated InAs emitter in a high magnetic field,” *J. Chin. Chem. Soc.* **47**, 609 (2000).
- K. SHIMAMURA, S. L. BALDOCHI, N. MUJILATU, K. NAKANO, T. FUJITA, Z. LIU, N. SARUKURA and T. FUKUDA**, “Growth of Ce-doped LiCaAlF<sub>6</sub> and LiSrAlF<sub>6</sub> single crystals by the Czochralski technique under CF<sub>4</sub> atmosphere,” *J. Cryst. Growth* **211**, 302 (2000).
- I. M. RANIERI, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, T. FUJITA, Z. LIU, N. SARUKURA and T. FUKUDA**, “Crystal growth of Ce:LiLuF<sub>4</sub> for optical applications,” *J. Cryst. Growth* **217**, 151 (2000).
- H. OHTA, K. KAWAMURA, M. ORITA, M. HIRANO, N. SARUKURA and H. HOSONO**, “UV-emitting diode composed of transparent oxide semiconductors: *p*-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/*n*-ZnO,” *Electron. Lett.* **36**, 1 (2000).

**Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Novel Design of High-Pulse-Energy Ultraviolet Ce:LiCAF Laser Oscillator,” *OSA TOPS Vol. 34 Advanced Solid State Lasers* 396 (2000).  
**T. KOZEKI, H. OHTAKE, N. SARUKURA, Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO and T. FUKUDA**, “Direct Generation of 27-mJ, 309-nm Pulses From a Ce:LLF Oscillator Using a Large-Size Ce:LLF Crystal,” *OSA TOPS Vol. 34 Advanced Solid State Lasers* 400 (2000).  
**Z. LIU, S. ONO, H. OHTAKE, N. SARUKURA, T. LIU, K. F. HUANG and C. L. PAN**, “Bulk InAs Mirror as a THz-Radiation Intra-Cavity Emitter in a Femtosecond Mode-Locked Ti:sapphire Laser,” *OSA TOPS Vol. 34 Advanced Solid State Lasers* 612 (2000).

#### B-2) 国際会議のプロシーディングス

**E. KAWAHATA, S. ONO, T. YANO, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High Power THz Radiation from an Optimized InAs Emitter in a Magnetic Field Irradiated with Femtosecond Laser Pulses,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Nice, paper CMB5 (2000).  
**H. MURAKAMI, Z. LIU, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Novel Double-Pass, High-Gain, Ti:Sapphire CW-Amplifier Delivering 82-MHz Repetition-Rate, 5.77-W Average-Power, Femtosecond Pulses,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Nice, paper CTuC7 (2000).  
**H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU and N. SARUKURA**, “Saturation of Intense THz-Radiation Power from Femtosecond-Laser Irradiated InAs in a High Magnetic Field,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Nice, paper CTuK112 (2000).  
**M. SAKAI, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Observation of New Excitation Channel of Cerium Ion Through LiCAF Host Crystal,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Nice, paper CWF27 (2000).  
**H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU, H. MURAKAMI and N. SARUKURA**, “Femtosecond-laser-irradiated, magnetic-field enhanced, InAs THz-radiation emitter and its saturation effect in high magnetic field,” Nonlinear Optics, Hawaii, paper TuB2 (2000).  
**Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, T. FUKUDA, Y. SEGAWA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Tunable ultraviolet solid-state lasers using large Ce:fluoride crystals and new pumping scheme,” Nonlinear Optics, Hawaii, paper WA4 (2000).  
**Z. LIU, H. MURAKAMI, T. KOZEKI, S. ONO, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High-average-power, high-repetition-rate, femtosecond Ti:sapphire lasers with intra-cavity and extra-cavity cw-amplification schemes,” Nonlinear Optics, Hawaii, paper WD4 (2000).  
**Z. LIU, S. ONO, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Bulk InAs mirror as a THz-radiation intra-cavity emitter in a femtosecond mode-locked Ti:sapphire laser,” *Advanced Solid-State Lasers*, Davos, paper TuB11 (2000).  
**T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Novel design of high-pulse-energy ultraviolet Ce:LiCAF laser oscillator,” *Advanced Solid-State Lasers*, Davos, paper WB1 (2000).  
**Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, N. MUJILATU, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Direct generation of 27-mJ, 309-nm pulses from a Ce:LLF oscillator using a large-size Ce:LLF crystal,” *Advanced Solid-State Lasers*, Davos, paper WB2 (2000).

- Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, N. MUJILATU, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High-pulse-energy ultraviolet Ce:LLF and Ce:LiCAF lasers using CZ-grown large-size crystals and new cavity configuration,” Conference on Lasers and Electro-Optics, California, paper CMD7 (2000).
- Z. LIU, S. ONO, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High-average-power femtosecond Ti:sapphire laser with an intracavity continuous-wave amplifier,” Conference on Lasers and Electro-Optics, California, paper CMQ6 (2000).
- S. ONO, T. TSUKAMOTO, H. OHTAKE, E. KAWAHATA, T. YANO and N. SARUKURA**, “Optimum geometry of the THz-radiation source using femtosecond pulse irradiated InAs (100) in a magnetic field,” Conference on Lasers and Electro-Optics, California, paper CThX3 (2000).
- H. OHTAKE, M. SAKAI, Z. LIU and N. SARUKURA**, “Saturation of THz-radiation from femtosecond-laser irradiated InAs in a high magnetic field,” Quantum Electronics and Laser Science Conference, California, paper QThI4 (2000).
- Z. LIU, Y. SUZUKI, S. ONO, H. OHTAKE, N. SARUKURA, T. A. LIU, K. F. HUANG and C. L. PAN**, “Efficient THz radiation generation from a bulk InAs mirror as an intracavity emitter,” International Photonics Conference, Taiwan, paper W-S2-A003 (2000).
- T. KOZEKI, Y. SUZUKI, M. SAKAI, H. OHTAKE, N. SARUKURA, Z. LIU, K. SHIMAMURA and T. FUKUDA**, “Observation of new excitation channel of Cerium ion through LiCAF host crystal,” International Photonics Conference, Taiwan, paper F-T3-D004 (2000).
- N. SARUKURA, H. OHTAKE, H. MURAKAMI, S. ONO and T. TSUKAMOTO**, “Intense THz radiation from InAs irradiated with femtosecond laser pulses in a magnetic field,” Infrared and Millimeter Waves Conference Digest, paper TU-D4 (2000).
- H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, H. MURAKAMI and N. SARUKURA**, “Geometrical sophisticated, magnetic-field enhanced, InAs THz-radiation emitter,” 2000 International Terahertz Workshop, Sandbjerg Castle, Denmark, p. 70 (2000).
- H. OHTAKE, Y. SUZUKI, N. SARUKURA, S. ONO, T. TSUKAMOTO, A. NAKANISHI, S. NISHIZAWA, M. L. STOCK, M. YOSHIDA and H. ENDERT**, “Thermal receiver detectable THz radiation from InAs irradiated with 1.04-mm femtosecond fiber laser in a 2-T permanent magnet,” 8th International Conference on Terahertz Electronics, Darmstadt, paper SII. 2 (2000).
- H. MURAKAMI, Z. LIU, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Novel double-pass, high-gain, Ti:sapphire cw-amplifier,” The 7th International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, paper TC-40 (2000).
- H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU and N. SARUKURA**, “Saturation of intense THz-radiation power from Ti:sapphire laser irradiated InAs in a high magnetic field,” The 7th International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, paper FC-5 (2000).
- E. KAWAHATA, T. YANO, H. OHTAKE, N. SARUKURA and T. TSUKAMOTO**, “High power THz radiation from an optimized InAs emitter irradiated with Ti:sapphire laser in a magnetic field,” The 7th International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, paper FC-6 (2000).
- H. OHTAKE, S. ONO, M. SAKAI, Z. LIU, H. MURAKAMI and N. SARUKURA**, “Optimum geometrical conditions for femtosecond-laser-irradiated, magnetic-field enhanced, THz-radiation InAs emitter and its saturation effect in high magnetic field,” The Twelfth International Conference on Ultrafast Phenomena, Charleston, paper MD5 (2000).

**Z. LIU, H. MURAKAMI, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Reflection-double-pass, Ti:sapphire continuous-wave amplifier delivering 5.77-W average power, 82-MHz repetition rate, 100-fs pulses,” The Twelfth International Conference on Ultrafast Phenomena, Charleston, paper MF23 (2000).

**Z. LIU, T. KOZEKI, Y. SUZUKI, N. SARUKURA, K. SHIMAMURA, T. FUKUDA, M. HIRANO and H. HOSONO**, “Chirped pulse amplification for ultraviolet femtosecond pulses using Ce:LiCAF gain medium,” The Twelfth International Conference on Ultrafast Phenomena, Charleston, paper PDP2 (2000).

**S. ONO, T. TSUKAMOTO, E. KAWAHATA, T. YANO, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “High Power THz Radiation from an Optimized InAs Emitter Irradiated with Ti:Salpphire Laser in a Magnetic Field,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper W-B-18 (2000).

**H. OHTAKE, M. SAKAI, Z. LIU and N. SARUKURA**, “Saturation of Intense THz-Radiation Power from Ti:Sapphire Laser Irradiated InAs in a High Magnetic Field,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper W-P-02 (2000).

**H. MURAKAMI, Z. LIU, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Novel Double-Pass, High-Gain, Ti:Salpphire CW-Amplifier,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper T-P-64 (2000).

**Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKAN, T. FUKUDA, T. KOZEKI, H. OHTAKE and N. SARUKURA**, “Noncollinear, Brewster-Pumped Ce:LiCAF Laser,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper T-P-94 (2000).

**T. KOZEKI, H. OHTAKE, N. SARUKURA, Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO and T. FUKUDA**, “Direct Generation of 27-mJ, 309-nm Pulses from a Ce:LLF Oscillator,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper T-P-99 (2000).

**K. SHIMAMURA, I. M. RANIERI, T. FUJITA, H. SATO, T. FUKUDA and N. SARUKURA**, “Crystal Growth of Fluorides by the Czochralski Technique for Optical Application,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper F-C-07 (2000).

**T. KOZEKI, M. SAKAI, H. OHTAKE, N. SARUKURA, Z. LIU, K. SHIMAMURA, K. NAKANO, N. MUJILATU and T. FUKUDA**, “Observation of New Excitation Channel of Cerium Ion through Li:CAF Crystal,” The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology, Sendai, paper F-C-08 (2000).

### B-3) 総説、著書

大竹秀幸、猿倉信彦,「テラヘルツ電磁波によるイメージング」, 電気学会 **120**, 27-30 (2000).

大竹秀幸、猿倉信彦,「フェムト秒レーザー励起による半導体からの高強度テラヘルツ光発生」, *O plus E* **22**, 62-68 (2000).

大竹秀幸、山本晃司、富永圭介,「テラヘルツ電磁波の分子科学への応用」, *分光研究* **49**, 149-151 (2000).

榎田孝司編、大竹秀幸、猿倉信彦他,「丸善 実験物理学講座9 レーザー測定」, 319-330 (2000).

### B-4) 招待講演

**N. SARUKURA**, “Chirped pulse amplification for ultraviolet pulses using the broad-band Ce<sup>3+</sup>:LiCaAlF<sub>6</sub> laser medium,” International Photonics Conference, Taiwan, December 2000.

**H. OHTAKE, Z. LIU, H. MURAKAMI, Y. SUZUKI, T. KOZEKI and N. SARUKURA**, “High-average-power, high-repetition-rate, femtosecond Ti:sapphire lasers with intra-cavity of extra-cavity cw-amplification schemes and its potential output-power scalability over 10-W level by cascading,” International Photonics Conference, Taiwan, December 2000.

**N. SARUKURA**, “Intense THz light source,” The 1st Asian Symposium on Ultrafast Phenomena, Korea, March 2000.

**N. SARUKURA**, “High power Ce fluoride lasers,” The 2nd International Symposium on Laser, Scitillator and Nonlinear Optical Materials, Lyon, May 2000.

**N. SARUKURA**, “Chirped pulse amplification for ultraviolet femtosecond pulses using Ce:LiCAF gain medium,” FRONTIER-SCIENCE RESERCH CONFERENCE Science and Technology of PHOTONIC MATERIALS, California, November 2000.

#### B-5) 受賞、表彰

猿倉信彦, 電気学会論文発表賞(1994).

猿倉信彦, レーザー研究論文賞(1998).

和泉田真司, 大幸財団学芸奨励生(1998).

劉振林, レーザー学会優秀論文発表賞(1998).

#### B-6) 学会および社会的活動

##### 学会の組織委員

FST '99 実行委員会(1998-99).

Ultrafast Phenomena プログラム委員(1997-).

GORDON CONFERENCE '99 INTERNATIONAL COMMITTEE (1998-99).

応用物理学会プログラム委員(1997-).

電気学会光量子デバイス技術委員(1998-).

レーザー学会年次大会実行委員(1998-).

レーザー学会中部支部組織委員(1998-).

Advanced Solid State Lasers プログラム委員(1999-).

##### 学術雑誌編集委員

レーザー研究 編集委員(1997-).

応用物理 編集委員(1999-).

JJAP 編集委員(1999-).

IEEE JSTQE 編集委員(2000-01).

#### B-7) 他大学での講義、客員

東京大学物性研究所客員助教授 (1998.4-98.9).

東京大学物性研究所客員助教授 (2000.4-01.3).

東北大学金属材料研究所客員助教授 (2000.10-01.3).

宮崎大学工学部非常勤講師 (1998.10-99.3).

理化学研究所非常勤フロンティア研究員 (1996.4-).



工業技術院電子技術総合研究所非常勤研究員 (1994.4-95.3, 98.7-98.9).

財団法人神奈川科学技術アカデミー非常勤研究員 (1998.5-).

National Research Council of Canada (1999.12).

Wien Technical University (2000.6).

#### C) 研究活動の課題と展望

遠赤外超短パルスレーザーにおいては、その実用という点において、ミリワット級のアベレージパワーを持つテラヘルツ放射光源の開発が課題となる。現在、我々のグループでは、強磁場印加すのもとで、平均出力でサブミリワット級のテラヘルツ電磁波光源の開発に成功している。この光源を用いて、今まで非常に難しいとされていたテラヘルツ領域の時間分解分光も容易に行っており、様々な興味深い現象を発見してきているため、光による物性制御などの実現が現実味を帯びてきている。また、新たなテラヘルツ光源として、有機物結晶や磁性半導体にも探索の範囲を広げる方針である。

深紫外波長可変全固体レーザーにおいては、大出力化と短波長化が当面の課題である。大出力化は励起配置や増幅光学系に特殊構造をもたせることによって大きな進歩が見込まれ、短波長化は新たなレーザー結晶を用いることにより具現化できる。現在、ロシア、東北大学との共同研究によるCe:LiCAF結晶を用いて、大出力紫外レーザーの開発を行っている。この共同研究により、200 nmより短波長での大出力深紫外波長可変全固体レーザーの実用化は、比較的早期に達成し得ると考えられている。

## 平等拓範(助教授)

A-1) 専門領域：量子エレクトロニクス、光エレクトロニクス、レーザー物理、非線形光学

A-2) 研究課題：広帯域波長可変クロマチップレーザーの研究

a) 高性能マイクロチップ固体レーザーの研究

a-1) 新型固体レーザー材料の研究

a-2) 高輝度Nd:YAGマイクロチップレーザーの研究

a-3) 高性能Yb:YAGマイクロチップレーザーの研究

b) 高性能非線形光学波長変換チップの研究

b-1) 高効率中赤外光発生用非線形波長変換方式の研究

b-2) 高性能非線形波長変換用QPMチップの開発研究

b-3) 新しい非線形光学波長変換方式と応用の研究

A-3) 研究活動の概略と主な成果

中赤外域から紫外域にわたる多機能な応用光計測を可能とする高機能・広帯域波長可変クロマチップレーザー (Chromatic Microchip Laser System; Chroma-Chip Laser) をめざして以下のような研究を進めている。

a-1) 日本に伝統的なセラミックスの持つ材料設計の可能性を利用した新型固体レーザー材料について開発研究を行っている。これまでにYAG単結晶では不可能であった、Nd高濃度添加YAGセラミックスを開発し、さらにマイクロチップレーザーに適用し、従来のNd:YAG単結晶の数倍の出力を得ることに成功した。また、セラミックスのフレキシブルな特性を用いることにより原子レベルでの材料の複合化に成功した。これは、固体レーザーの高出力化の障害となる励起に伴う熱問題を緩和するものであり今後の展開が期待されている。さらに、YAGの倍程度の熱伝導率を有する $Y_2O_3$ やSelf-doublingの可能なGdYCOBや高効率化の可能なBSOなど半導体レーザー励起マイクロチップ固体レーザーの観点より材料開発に強い他機関と連携しながら新材料の研究、開発を進めている。

a-2) LD励起方式では、放電管励起方式と比べ、小型、長寿命、低電力動作が可能である特性に加え、励起光を空間的、スペクトル的に集中させた高密度励起が可能である特長を有する。すなわち、レーザー媒質の吸収係数が高い波長域で、レーザー発振する空間領域のみを選択的に励起できる。このため、高出力化の際に問題となった発熱も抑制され、冷却機構が簡単になり、小型高効率化、高安定動作が可能となった。我々はLD励起方式を最適設計するための高次横モードを含むレーザービームの取り扱い法を検討し、モード品質を示す量として導入されつつある $M^2$ 因子を用いた設計法を新たに提案してきた。これにより、Nd:YVO<sub>4</sub>マイクロチップレーザーにおいて、スロープ効率58.6%を達成し、さらに共振器内部SHG方式において240 mWのグリーン光を得ることができた。次に、パワースケーリングを図り、Nd:YAGにおいて最大出力4.1 Wをスロープ効率57%で得た。これらの値はNdレーザーにおいてはほぼ限界の最大値である。さらに、高輝度化を図るため拡散接合型Nd:YAG結晶にCr:YAGを併用した受動Qスイッチレーザーを試作し、最大平均出力4.2 Wと非常に高い値を得た。現在は、このレーザーを励起源とした赤外光発生を検討中である。

a-3) 90年代に入り、Yb:YAGは、レーザー励起により高性能なレーザーとなり得ることが発見された。以来、我々は先導的な研究を行ってきた。Yb:YAGは高出力、高効率発振が可能と言われながらも準四準位レーザーであるため、励起状態に敏感であり、高密度励起が実現されない場合は、発振効率が大きく損なわれる欠点を有する。全固体レ

ザーの励起光源として注目される半導体レーザーは、ビーム品質が劣悪であるため、その高密度励起光学系の設計が困難であったが、モード品質を示す量として導入されつつあるM<sup>2</sup>因子を利用することにより半導体レーザー励起固体レーザーの最適化に成功した。現在、長さ400 μmのYb:YAGマイクロチップ結晶から、常温で、スロープ効率60%、CWで3 Wの出力を確認している。また、最近、アップコンバージョン損失が無いことを利用し上記構成で85 nmと蛍光幅の9倍にも及ぶ広帯域波長可変動作を実現した。このことは、高平均出力の超短パルスレーザーとしての可能性を示唆するものと考えている。

b-1)レーザーは発明以来優れた光源として種々の分野で利用されているが、発振波長は限定されていた。非線形光学に基づく波長変換法ではレーザー光のコヒーレンス特性を損なわずに高効率に異なった波長に変換できる特長を持っている。しかしながら、赤外領域および紫外領域でも多くの報告が出ているものの分子科学に限らず種々の応用に足るスペクトル特性、出力特性を実現する非線形光学結晶は得られていない。一方、最近提案された擬似位相整合(Quasi Phase Matching:QPM)波長変換法では、位相整合条件を光リソグラフィによるデジタルパターンで設計できるため変換効率や位相整合波長が設計できるだけでなく空間領域、周波数領域、時間領域で位相整合特性を設計できるため従来結晶にQPM構造を導入することは新規結晶を開発したと同等もしくはそれ以上のインパクトを与える。

本研究では、OPO、DFGを組み合わせることで波長6 μm領域の広帯域赤外光を高効率に発生することを検討している。ここでは、ニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)にQPM構造を導入したQPM-LiNbO<sub>3</sub>を検討している。この場合、最適な周期や領域長が決定されれば、光リソグラフィにより1つの結晶上にOPOとDFGの2つの機能を持たせることも可能になる。これまでにOPOによる3 μm域までの中赤外光発生を確認している。現在、6 μm域発生用DFG光源と性能評価用の分光分析装置を試作開発中である。

b-2)QPMデバイスには材料としてLiNbO<sub>3</sub>が広く用いられているが、従来のプロセスでは分極を反転させるための印加高電界を深さ方向に制御することが不可能であり、原理的な検証は可能でも実用的な出力を得ることは困難であった。現在、初期的なQPM-LiNbO<sub>3</sub>を用いた赤外光発生実験と高出力化のための大断面積QPM-LiNbO<sub>3</sub>作成プロセス開発を併行して進めている。IMSマシンとして開発している新規プロセス用チャンバーでは、均一高電界を実現するための雰囲気制御などが可能になるものであり、これにより実用的な赤外域のQPMチップ作成が期待できる。しかし、既存の非線形光学結晶では透明領域が5~6 μm以下と限られている。一方、高い性能指数を有する化合物半導体は赤外域でも透明度が高く大きな熱伝導率を有するが、複屈折性を持たないため複屈折位相整合(BPM)が不可能であり従来は非線形光学結晶としては検討されてこなかった。ここでは、拡散接合によりQPM構造を導入すること検討しており、そのための新規プロセスを開発中である。これまでに100 μm厚のGaAsプレートを拡散接合により4枚スタックすることに成功した。現在、その光学的な特性などを評価中である。

b-3)一方、紫外域においては、天然に豊富に存在し、堅牢で200 nm以下の短波長領域までの透過特性を有する水晶を用いることを検討している。しかし、水晶ではBPMによる位相整合が不可能であるだけでなく、自発分極を持たないため電界ポーリングも不可能である。そこで、応力による擬似位相整合法を検討し、その可能性を見出した。今後も、従来は発生が不可能または困難とされてきた紫外域や中・遠赤外域光の高効率発生やCW発生法を目指した新しい非線形波長変換方式を検討する予定である。

その他、これまでに開発した共振器内部SHG型Yb:YAGマイクロチップレーザーにおいて、500 mW級の単一周波数青緑色光を得ている。さらに、同調素子を挿入することで、515.25 ~ 537.65 nmと22.4 nm(24.4 THz)にわたる広帯域の波長可変特性も確認した。この応用として、Fe:LiNbO<sub>3</sub>結晶のフォトリフラクティブ効果を用いた全固体型光メモリ方式を検討し、波長多重記録に始めて成功した。同一空間への多重記録が可能な波長多重型ホログラフィッ

ク体積メモリは、次世代の超高密度光メモリとして、注目されている。

以上、広帯域波長可変光源をめざして高輝度マイクロチップレーザー、高性能非線形波長変換チップ、さらに新規光源を用いた新しい応用までを含めた研究開発を進めている。

#### B-1) 学術論文

**A. IKESUE, T. TAIRA, Y. SATO and K. YOSHIDA**, “High-performance microchip lasers using polycrystalline Nd:YAG ceramics,” *J. Ceram. Soc. Jpn.* **108**, 248 (2000).

**I. SHOJI, S. KURIMURA, Y. SATO, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Optical properties and laser characteristics of highly Nd<sup>3+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics,” *Appl. Phys. Lett.* **77**, 939 (2000).

**I. SHOJI, S. KURIMURA, Y. SATO, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Optical properties and laser oscillations of highly neodymium-doped YAG ceramics,” *OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers* **34**, 475 (2000).

**J. SAIKAWA, S. KURIMURA, N. PAVEL, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Performance of widely tunable Yb:YAG microchip lasers,” *OSA TOPS on Advanced Solid-State Lasers* **34**, 106 (2000).

#### B-2) 国際会議のプロシーディングス

**I. SHOJI, S. KURIMURA, Y. SATO, J. SAIKAWA, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Optical properties and laser characteristics of highly Nd<sup>3+</sup>-doped YAG ceramics,” *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers 2000 MF7*, 174-176 (2000).

**J. SAIKAWA, S. KURIMURA, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Yb:YAG based tunable green microchip laser for wavelength-multiplexed volume holography,” *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers 2000 MB1*, 24-26 (2000).

**I. SHOJI, S. KURIMURA, Y. SATO, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Optical properties and laser performances of highly neodymium-doped YAG ceramics,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2000 CThM9*, 456-457 (2000).

**J. SAIKAWA, S. KURIMURA, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Tunable single-frequency Yb:YAG microchip green laser,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2000, CThJ5*, 439-440 (2000).

**S. KURIMURA, M. FEJER, I. SHOJI, T. TAIRA, Y. UESU and H. NAKAJIMA**, *The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-1), WC-07*, 106-107 (2000).

**I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Highly Nd<sup>3+</sup>-doped YAG ceramics for high power microchip lasers,” *The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-1), TC-05*, 354-355 (2000).

**Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA and A. IKESUE**, “Spectroscopic properties of neodymium-doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics,” *The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-1), TP-63*, 472-473 (2000).

**J. SAIKAWA, S. KURIMURA, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Wavelength-multiplexed holographic recording in Fe:LiNbO<sub>3</sub> tunable Yb:YAG green laser,” *The 1st Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-1), Sendai, JAPAN, WP-15*, 168-169 (2000).

**N. PAVEL, S. KURIMURA, I. SHOJI, J. SAIKAWA and T. TAIRA**, “High average power diode-pumped composite Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber,” *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe CLEO/EUROPE-EQEC 2000, Nice, FRANCE, 10-15 September 2000, CWB6*, p.177 (2000).

### B-3) 総説、著書

平等拓範,「オンチップレーザーによる高コヒーレント化」, *光技術動向調査報告書* **16**, 448 (2000).

平等拓範,「マイクロチップレーザーの新展開」, *Laser Expo 2000 / 特別技術セミナー A6* (2000).

平等拓範,「新材料による固体レーザーの超小型化と多機能化」, *セラミックス* **35**, 279 (2000).

平等拓範他,「CLEO/QELS 2000 報告」, *レーザー研究* **28**, 526 (2000).

栗村直, M. Fejer, 平等拓範, 上江洲由晃, 中島啓幾,「紫外波長変換をめざした擬似位相整合水晶」, *応用物理* **69**, 548 (2000).

### B-4) 招待講演

平等拓範,「マイクロチップ固体レーザー」, レーザー学会第264回研究会, 福岡, 2000年1月.

平等拓範,「レーザー光源の新展開 マイクロチップ固体レーザーとセラミックスYAG」, 結晶成長学会研究会, つくば, 2000年2月.

平等, 秋山,「ASSL 国際会議報告」, 電気学会調査専門委員会, 東京, 2000年3月.

平等拓範,「マイクロチップレーザーの新展開」, *Laser Expo 2000/特別技術セミナー*, 横浜, 2000年4月.

**T. TAIRA**, “Tunable Yb:YAG micrichip lasers,” The 2nd International Symposium on Laser, Scintillaor and Nonlinear Optical Materials, Lyon (France), May 2000.

平等拓範,「マイクロチップレーザーの可能性」, 国研セミナー, 岡崎, 2000年6月.

平等拓範,「CLEO 報告」, レーザー学会専門委員会, 岡崎, 2000年6月.

平等拓範,「CLEO 国際会議報告」, 電気学会調査専門委員会, 東京, 2000年7月.

平等拓範,「誘電体材料を用いた光源の多様化」, 結晶成長学会研究会, つくば, 2000年7月.

**N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Diode Side-pumped microchip composite Yb:YAG laser: design and power scaling,” Proc. SPIE of ROMOPTO 2000 Conference, Bucharest (Romania), September 2000.

栗村直,「CLEO 会議報告」, 学術振興会第130委員会, 東京, 2000年9月.

平等拓範,「高性能マイクロチップレーザーの展望」, 分子研一般公開, 岡崎, 2000年10月.

**T. TAIRA, J. SAIKAWA and N. PAVEL**, “Solid-State diode end-pumped Yb:YAG microchip lasers,” FSRC Frontier Science Research Conferences, La Jolla International School of Science, La Jolla, Los Angeles (U. S. A.), November 2000.

平等拓範,「Nd:YAG セラミックスの熱複屈折特性」, 第2回光量子科学研究シンポジウム, 日本原子力研究所, 奈良, 2000年11月.

平等拓範,「レーザーの原理から研究最先端まで」, 大阪工業大学, 大阪, 2000年11月.

平等拓範,「マイクロチップ固体レーザーの進展」, ファインセラミックス技術者講座 シリーズ No.6, (財)ファインセラミックスセンター, 愛知, 2000年11月.

**N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “CW Edge-Diode-Pumped Composite Yb:YAG Laser,” LASERS 2000 Conference, Albuquerque, New Mexico (U. S. A.), December 2000

平等拓範,「広帯域波長可変クロマチップレーザー」, レーザー学会第282回研究会, 広島, 2000年12月.

**T. TAIRA**, “Chroma-Chip Lasers for Nonlinear Wavelength Conversion and Photorefractive Optical Memory,” International Photonics Conference IPC2000, Hsinchu (Taiwan), December 2000.

**S. KURIMURA**, “Polarity engineering, periodically poled QPM devices,” International Photonics Conference IPC2000, Hsinchu (Taiwan), December 2000.

## B-5) 受賞、表彰

平等拓範, 第23回(社)レーザー学会業績賞(論文賞)(1999).  
平等拓範, 第1回(財)みやぎ科学技術振興基金研究奨励賞(1999).  
栗村直, レーザー顕微鏡研究会優秀賞(1996).  
Nicolai Pavel, The LASERS '99 Award for the most outstanding contributed paper (1999).  
齋川次郎, 応用物理学会北陸支部発表奨励賞(1998).

## B-6) 学会および社会的活動

### 学協会役員、委員

平等拓範, レーザー学会、レーザー素子機能性向上に関する専門委員会幹事(1997-99).  
平等拓範, レーザー学会、研究会委員(1999-).  
平等拓範, 電気学会、高機能全固体レーザーと産業応用調査専門委員会幹事(1998-).  
平等拓範, レーザー学会、専門委員会幹事(2000-).  
平等拓範, 福井大学、非常勤講師(1999-).  
平等拓範, 宮崎大学、非常勤講師(1999-).  
平等拓範, 理化学研究所、非常勤研究員(1999-).  
平等拓範, 米国スタンフォード大学、客員研究員(1999-).  
栗村直, 日本光学会、論文抄録委員会委員(1997-98).  
栗村直, 応用科学会、常任評議委員(1997-).  
栗村直, 科学技術庁、振興調整費自己組織化作業分科会委員(1997-).  
栗村直, 日本光学会中部地区幹事(2001-).

### 科学研究費の研究代表者、班長等

平等拓範, 基盤B(2)展開研究(No. 10555016)研究代表者(1998-).  
平等拓範, 基盤B(2)一般研究(No. 11694186)研究代表者(1999-).  
平等拓範, 地域連携推進研究(No. 12792003)研究代表者(2000-).  
栗村直, 萌芽的研究(No. 12875013)研究代表者(2000-).

## C) 研究活動の課題と展望

結晶長が1 mm以下のマイクロチップ固体レーザーの高出力化、高輝度化、多機能化と高性能な非線形波長変換方式の開発により従来のレーザーでは困難であった、いわゆる特殊な波長領域を開拓する。このため新レーザー材料の開発、新レーザー共振器の開発を行う。さらに、マイクロチップ構造に適した発振周波数の単一化、波長可変性、短パルス化についても検討したい。このような高輝度レーザーは多様な非線形波長変換を可能にする。そこで、従来の波長変換法の限界を検討するとともに、これまでの複屈折性を用いた位相整合法では不可能であった高性能な非線形波長変換を可能とする新技術である擬位相整合法のためのプロセス及び設計法の研究開発を行う。

近い将来、高性能の新型マイクロチップ固体レーザーや新しい非線形波長変換チップの研究開発により、中赤外域から紫外域にわたる多機能な応用光計測を可能とする高機能・広帯域波長可変クロマチップレーザー(Chromatic Microchip Laser System; Chroma-Chip Laser)が実現できると信じている。