

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

a1) 固体レーザー材料の研究

a2) 高輝度Ndレーザーの研究

a3) 高性能Yb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

b1) 高効率中赤外光発生法の研究

b2) 高性能QPMチップ作成法の研究

b3) 多機能非線形波長変換法の研究

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。

a1) レーザー材料の分光特性を詳細に調べるにより、半導体レーザー(LD)励起固体レーザー(DPSSL)の中でも代表的なNd:YAGレーザーの性能を飛躍的に高めることのできる励起法を見出すことができた。Nd:YAGはGaAlAs-LDに適した808 nm(${}^4I_{9/2}$ - ${}^4F_{5/2}$)に強い吸収があったことが幸いしたものであるが、1064 nm発振に対する原子量子効率を76%と制限する要因ともなっていた。我々は、最近になりNd³⁺高濃度添加YAGにおいて上準位直接励起(${}^4I_{9/2}$ - ${}^4F_{3/2}$)を行うことでレーザー性能が著しく向上することを実証した。一方で、YAGの結晶構造に対する詳細な研究により、励起に付随し誘起される熱複屈折特性を大幅に改善できる新構成を発見した。YAGに関する研究の殆どは30年近く前に成された解析に帰着するが、これに致命的な誤りがあった。基礎に立ち返った検討の結果、従来広く用いられている熱複屈折解消法を必要としない簡便な手法を提案することができた。また、新材料探索としてNd高濃度添加の可能なセラミックYAG、YAGの倍程度の熱伝導率を有するY₂O₃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研究、開発を進めている。

a2) 小型固体レーザーの究極であるマイクロチップレーザーの高輝度化を、代表的なNd系固体レーザーを中心に進めている。これまでにモード品質を示す量として導入されつつあるM²因子を用いた設計法を提案、Nd:YVO₄マイクロチップレーザーにおいて、スロープ効率58.6%を達成している。次に、パワースケーリングを図り、Nd:YAGを用いて最大出力4.1 Wをスロープ効率57%で得た。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、最大平均出力4.2 Wを得た。さらに、小型簡便構成を継承しつつ高機能な応用を目指した、受動Qスイッチの制御法を検討している。すでに、パルスエネルギー500 μJ、パルス幅2 ns、スペクトル線幅0.05 nmで得ている。現在、このレーザーの実用化を進めるとともに、非線形波長変換による紫外光及び赤外光発生を検討中である。

a3) 90年代に入り、レーザーには不向きとされていたYb系材料が、LD励起により高性能なレーザーとなり得ることが

報告された。以来、我々はこの分野でも先導的な研究を行ってきた。高出力化が期待されているYb:YAGは、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、条件によっては、発振効率が大きく損なわれる欠点を有する。全固体レーザーの励起光源であるLD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、 M^2 因子設計法を改良することでDPSSLの最適化を容易にした。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、複合共振器構成により狭線幅で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。一方、マイクロチップレーザーの高出力化を図るため、励起パワーのスケールアップが容易なエッジ励起法を考案し、準CW励起により最大出力41 W、スロープ効率38%を達成した。現在、高ビーム品質を維持しながら、さらなる高出力化を図る新規構成を検討している。

b1) レーザーは高輝度の優れた光源であるが、発振波長が限定されていることがその応用を制限していた。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、分子科学に限らず種々の応用分野から、より高度な非線形光学波長変換法が求められている。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。

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_3)にQPM構造を導入したQPM- LiNbO_3 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た。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。

b2) QPMデバイスには材料として LiNbO_3 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_3 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_3 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パーでは、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)が不可能なため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。

b3) 一方、QPM法では波長変換特性を設計できるものの許容幅が狭くなることが問題であった。非線形材料の分散特性を詳細に調べ、 MgO:LN の d_{31} を用いることで通信に有用な1.56 μm で $\partial\Lambda/\partial\lambda = 0$ となることを見出し、実験により52 nmの広帯域位相整合特性を実証した。このことは通信領域での超短パルスの取り扱いを可能とするものであり、今後の展開が期待されている。

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 μW 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_3 結晶のフォトリ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

N. PAVEL, J. SAIKAWA and T. TAIRA, “Radial-pumped microchip high-power composite Yb:YAG laser: design and power characteristics,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 146 (2001).

N. SENGUTTUVAN, N. KIDOKORO, K. OOTSUKA, M. ISHII, M. KOBAYASHI, T. TAIRA, Y. SATO and S. KURIMURA, “Crystal growth and optical properties of $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}$,” *J. Cryst. Growth* **229**, 188 (2001).

N. SENGUTTUVAN, K. OOTSUKA, N. KIDOKORO, M. ISHII, M. KOBAYASHI, T. TAIRA, Y. SATO, S. KURIMURA and M. IMAEDA, “Crystal Growth and Characterization of New Laser Crystal $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}$,” *Memoirs Shonan Inst. Tech.* **35**, 29 (2001).

N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA, “High average power diode end-pumped composite Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr^{4+} :YAG saturable absorber,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1253 (2001).

Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA, N. SENGUTTUVAN, M. ISHII and M. KOBAYASHI, “Optical absorption and emission spectroscopy of Nd: $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ grown by Bridgman method,” *OSA TOPS* **50**, 67 (2001).

N. PAVEL, J. SAIKAWA and T. TAIRA, “Intra-cavity frequency doubling of a diode-pumped Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr^{4+} :YAG saturable absorber,” *OSA TOPS* **50**, 246 (2001).

I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, V. LUPEI, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA, “Thermal birefringence in Nd:YAG ceramics,” *OSA TOPS* **50**, 273 (2001).

Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA and A. IKESUE, “Spectroscopic properties of Neodymium-doped Y_2O_3 ceramics,” *OSA TOPS* **50**, 417 (2001).

V. LUPEI, A. LUPEI, N. PAVEL, T. TAIRA, I. SHOJI and A. IKESUE, “Laser emission under resonant pump in the emitting level of concentrated Nd:YAG ceramics,” *Appl. Phys. Lett.* **79**, 590 (2001).

V. LUPEI, T. TAIRA, A. LUPEI, N. PAVEL, I. SHOJI and A. IKESUE, “Spectroscopy and laser emission under hot band resonant pump in highly doped Nd:YAG ceramics,” *Opt. Commun.* **195**, 225 (2001).

N. PAVEL, J. SAIKAWA and T. TAIRA, “Diode end-pumped passively Q-switched Nd:YAG laser intra-cavity frequency doubled by LBO crystal,” *Opt. Commun.* **195**, 233 (2001).

V. LUPEI, A. LUPEI, S. GEORGESCU, T. TAIRA, Y. SATO and A. IKESUE, “The effect of Nd concentration on the spectroscopic and emission decay properties of highly doped Nd:YAG ceramics,” *Phys. Rev. B* **64**, 092102 (2001).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “Laser emission in highly-doped Nd:YAG crystals under $^4F_{5/2}$ and $^4F_{3/2}$ pumping,” *Opt. Lett.* **26**, 1678 (2001).

V. LUPEI, A. LUPEI, N. PAVEL, T. TAIRA and A. IKESUE, “Comparative investigation of spectroscopic and laser emission characteristics under direct 885-nm pump of concentrated Nd:YAG ceramics and crystals,” *Appl. Phys. B* **73**, 757 (2001).

B-2) 国際会議のプロシーディングス

- N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Microchip high-power radially-pumped composite Yb:YAG laser,” ROMOPTO 2000, 6th Conference on Optics, proceeding of SPIE, **4430**, 27-34 (2001).
- N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Continuous-wave diode radial-pumped composite Yb:YAG laser,” *Proceeding of the international conference on LASERS 2000* 790-795 (2001).
- Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA, N. SENGUTTUVAN, M. ISHII and M. KOBAYASHI**, “Optical absorption and emission spectroscopy of Nd:Bi₄Si₃O₁₂ grown by Bridgman method,” *OSA Topical meeting on Advanced Solid-State Lasers 2001, Technical Digest MB4*, 31-33 (2001).
- N. PAVEL, S. KURIMURA, J. SAIKAWA, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Diode-pumped Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG saturable absorber and intra-cavity frequency-doubled by LBO crystal,” *OSA Topical meeting on Advanced Solid-State Lasers 2001, Technical Digest ME8*, 144-146 (2001).
- I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Thermal birefringence in Nd:YAG ceramics,” *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers 2001, Technical Digest* 162-164 (2001).
- Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA and A. IKESUE**, “Spectroscopic properties of neodymium-doped Y₂O₃ ceramics,” *OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers 2001* 258-260 (2001).
- S. KURIMURA, I. SHOJI, T. TAIRA, J. H. RO and M. CHA**, “Coercive field dependence on Mg concentration in MgO:LiNbO₃,” CLEO 2001, CTuI3, 139 (2001).
- N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Diode Radial-Pumped Composite Yb:YAG Microchip Laser,” CLEO 2001, CTuM25, 171 (2001).
- N. PAVEL, J. SAIKAWA, S. KURIMURA, I. SHOJI and T. TAIRA**, “Intra-cavity frequency doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr⁴⁺:YAG saturable absorber,” CLEO 2001, CTuM27, 172 (2001).
- V. LUPEI, A. LUPEI, B. DIACONESCU, S. GEORGESCU, T. TAIRA, Y. SATO, S. KURIMURA and A. IKESUE**, “Spectroscopic properties of highly doped Nd:YAG ceramics,” CLEO 2001, CWA21, 281 (2001).
- Y. SATO, I. SHOJI, S. KURIMURA, T. TAIRA, H. HURUYA, H. NAKAO, Y-K. YAP, M. YOSHIMURA, Y. MORI and T. SASAKI**, “Spectroscopic properties of GdYCOB single crystals doped with rare-earth trivalent,” CLEO 2001, CWA24, 284 (2001).
- V. LUPEI, T. TAIRA, N. PAVEL, I. SHOJI and A. IKESUE**, “Laser emission under resonant pump in the emitting level of highly doped Nd materials,” CLEO 2001, CFD4, 559 (2001).
- I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA**, “Thermal birefringence in Nd³⁺-doped YAG ceramics,” CLEO 2001, CFD6, 560 (2001).
- S. KURIMURA, I. SHOJI, T. TAIRA, J. H. RO, M. CHA, T. FUKUDA, H. SEKI and H. NAKAJIMA**, “Optically-monitored periodical poling for fabrication of quasi-phase-matched wavelength converter,” CLEO/PR 2001, MF1-2, I-120 (2001).
- N. E. YU, J. H. RO, M. CHA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Broad Band Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation with MgO doped Periodically Poled LiNbO₃,” CLEO/PR 2001, MF1-3, I-122 (2001).
- M. CHA, S. KURIMURA and T. TAIRA**, “Transverse Beam Effect on Mode Locking by Cascading of Quadratic Non-linearities,” CLEO/PR 2001, MF3-3, I-123 (2001).

V. LUPEI, A. LUPEI, S. GEORGESCU, B. DIACONESCU, T. TAIRA, Y. SATO, S. KURIMURA and A. IKESUE, “High resolution spectroscopy of concentrated Nd:YAG ceramics,” CLEO/PR 2001, M11-1, I-205 (2001).

V. LUPEI, T. TAIRA, N. PAVEL, I. SHOJI, A. LUPEI and A. IKESUE, “Efficient laser emission in resonantly pumped highly concentrated Nd:YAG ceramics,” CLEO/PR 2001, M11-3, I-208 (2001).

I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, V. LUPEI, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA, “Thermal birefringence effect in Nd³⁺-doped YAG ceramics,” CLEO/PR 2001, M11-5, I-212 (2001).

S. KAWATO, Y. SUGIURA, T. KOBAYASHI and T. TAIRA, “Optimum design of highly efficient end-pumped Yb:YAG rod amplifier,” CLEO/PR 2001, Tu11-1, I-544 (2001).

T. TAIRA, N. PAVEL and V. LUPEI, “Highly efficient Nd-ion doped microchip lasers under hot band pumping,” 2001 International Laser, Lightwave and Microwave Conference Proceedings, Shanghai(China), 170-171 (2001).

B-3) 総説、著書

I. SHOJI and T. TAIRA, “Trend of Microchip laser development,” *Optical Alliance* **12**, 19-24 (2001).

I. SHOJI, T. TAIRA and A. IKESUE, “Ceramic lasers,” *The Transactions of the Inst. of Electro., Information and Communication Engineers C* **J84-C**, 918-925 (2001).

B-4) 招待講演

平等拓範, 「LD励起Yb:YAGレーザの開発研究」, 電気学会, パワー半導体レーザ技術調査専門委員会, 東京, 2001年3月.

T. TAIRA, “Direct-pumped highly Nd-ion doped microchip lasers,” Medical Laser Research Center in Dankook university, Korea, November 2001.

T. TAIRA, “Highly doped Nd:YAG ceramics for microchip lasers,” The 9th symposium on laser spectroscopy, Korea, November 2001.

T. TAIRA, “Microchip lasers,” Stanford University, Ginzton lab., U. S. A., December 2001.

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).

平等拓範, 第51回(社)日本金属学会金属組織写真奨励賞(2001).

斎川次郎, 応用物理学会北陸支部発表奨励賞(1998).

庄司一郎, 第11回(2001年秋季)応用物理学会講演奨励賞(2001).

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(1997-1999).

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, レーザー用先端光学材料に関する専門委員会委員 (2000-).

平等拓範, レーザー学会, 学術講演会プログラム委員 (2001-).

平等拓範, LASERS 2001, 国際会議プログラム委員 (2001-).

平等拓範, 米国スタンフォード大学, 客員研究員 (1999-2002).

平等拓範, 宮崎大学, 非常勤講師 (1999-2000).

平等拓範, 福井大学, 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, 物質・材料研究機構, 客員研究員 (2001-).

栗村 直, 日本光学会, 論文抄録委員会委員 (1997-1998).

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, 企画・事業担当幹事 (2000-2001).

栗村 直, レーザー学会, 学術講演会プログラム委員 (2001-).

庄司一郎, 日本光学会, 企画・事業担当幹事 (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 (1998-2000).

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-).

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。