

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) 近年の半導体レーザー(LD)の高出力化、長寿命化などに刺激され、これを励起源とした固体レーザー(DPSSL)の研究が活発となった。今日DPSSLは、非線形波長変換技術と相まって基礎科学から産業分野にわたる広い領域でブレークスルーを起こすキーデバイスとして注目されている。DPSSLの代表である1064 nm発振Nd:YAGレーザーは、波長808 nmで励起されるため量子効率は76%が限界となり、励起パワーのうち3~4割が熱となり失われてしまう問題を有している。そのため極限的な性能を発揮させるためには強励起により顕在化する熱複屈折や熱レンズ、熱複屈折、さらには熱による破壊等の様々な熱問題を解決しなければならない。これに対し、我々は希土類イオンの発光過程を詳細に解析し、量子欠損すなわち発熱を大幅に低減できるホットバンド直接励起(885 nmによる $^4I_{9/2}$ 準位から $^4F_{5/2}$ 準位への励起)法の有用性をNd³⁺高濃度添加YAGを用いることで実証した。さらに、Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄を用いてスロープ効率80%と量子限界に迫る高効率特性を記録した。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や広利得幅のYSAG、Self-doublingの可能なGdYCOBなどLD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Nd系固体レーザーを中心に進めている。これまで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、先の直接励起法を適用することで、Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄を用いてスロープ効率80%と量子限界に迫る高効率特性を記録した。次に、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開発した。次に、浜松ホトニクス(株)に技術移転し、パルスエネルギー500 μJ、パルス幅2 ns出力を単一縦モードのマイクロチップレーザーを実

用化した。これまでに(独)通信総合研究所等に納入し、人工衛星を用いた実験に適用された。現在、このレーザーの高機能化として、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%以上の高い量子効率を有するYb:YAGは、レーザー下準位が基底準位群に属するため永らくレーザーには不向きな材料とされてきた。しかしながら、90年代に入りLDによる高密度励起の適用により状況は一変した。我々はYb系固体レーザー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。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リング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130 W、スロープ効率63%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ため応用が制限されていた。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が、従来の方法では分子科学に限らず種々の分野から求められている高度な応用には適さなかった。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、マグネシウム添加ニオブ酸リチウム($\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$)にQPM構造を導入したQPM- $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 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 (LN)が広く用いられているが、従来の無添加LNでは光損傷のため高温での動作を余儀なくされていただけでなく、高い抗電界のため薄い素子しか作成できず実用的なQPM素子は望めなかった。一方で、MgO添加によりこれらの欠点が克服されることが知られていたがQPM構造を作り込むことは困難とされていた。これに対し我々は、分極反転その場観察装置を開発し反転メカニズムの詳細な特性を評価するとともに、新たに金属電極を用いて、抗電界の温度依存特性を調べることにより最適なプロセスを開発した。結果として、3 mm厚の $\text{MgO}:\text{LN}$ を30 μm 周期でQPM構造を作成することに成功した。

ところで、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。

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、 $\text{MgO}:\text{LN}$ 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。さらに、カスケードによるパルス圧縮効果も確認した。このことはQPM

素子により超短パルスの多彩な取り扱いが可能であることを示唆するものであり、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:LiNbO₃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

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “Highly Efficient Laser Emission in Concentrated Nd:YVO₄ Components under Direct Pumping into the Emitting Level,” *Opt. Commun.* **201**, 431–435 (2002).

J. SAIKAWA, S. KURIMURA, I. SHOJI and T. TAIRA, “Tunable Frequency-Doubled Yb:YAG Microchip Lasers,” *Opt. Mater.* **19**, 169–174 (2002).

I. SHOJI, Y. SATO, S. KURIMURA, V. LUPEI, T. TAIRA, A. IKESUE and K. YOSHIDA, “Thermal-Birefringence-Induced Depolarization in Nd:YAG Ceramics,” *Opt. Lett.* **27**, 234–236 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “Efficient Laser Emission in Concentrated Nd Laser Materials under Pumping into the Emitting Level,” *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 240–245 (2002).

V. LUPEI, A. LUPEI, S. GEORGESCU, B. DIACONESCU, T. TAIRA, Y. SATO, S. KURIMURA and A. IKESUE, “High-Resolution Spectroscopy and Emission Decay in Concentrated Nd:YAG Ceramics,” *J. Opt. Soc. Am. B* **19**, 360–368 (2002).

I. SHOJI and T. TAIRA, “Intrinsic Reduction of the Depolarization Loss in Solid-State Lasers by Use of a (110)-Cut Y₃Al₅O₁₂ Crystal,” *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3048–3050 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “1064-nm Laser Emission of Highly Doped Nd:yttrium Aluminum Garnet under 885-nm Diode Laser Pumping,” *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4309–4311 (2002).

N. E. YU, J. H. RO, M. CHA, S. KURIMURA and T. TAIRA, “Broadband Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation in MgO-Doped Periodically Poled LiNbO₃ at the Communications Band,” *Opt. Lett.* **27**, 1046–1048 (2002).

T. DASCALU, T. TAIRA and N. PAVEL, “Diode Edge-Pumped Microchip Composite Yb:YAG Laser,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L606–L608 (2002).

I. SHOJI and T. TAIRA, “Drastic Reduction of Depolarization Resulting from Thermally Induced Birefringence by Use of a (110)-Cut YAG Crystal,” *OSA TOPS* **68**, 521–525 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “Highly Efficient Continuous-Wave 946-nm Nd:YAG Laser Emission under Direct 885-nm Pumping,” *Appl. Phys. Lett.* **81**, 2677–2679 (2002).

Y. SATO and T. TAIRA, “Spectroscopic Properties of Neodymium-Doped Yttrium Orthovanadate Single Crystals with High-Resolution Measurement,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 5999–6002 (2002).

T. DASCALU, T. TAIRA and N. PAVEL, “100-W Quasi-Continuously-Wave Diode Radial Pumped Microchip Composite Yb:YAG Laser,” *Opt. Lett.* **27**, 1791–1793 (2002).

B-2) 国際会議のプロシーディングス

I. SHOJI and T. TAIRA, “Great reduction of thermally-induced-birefringence depolarization by use of a (110)-cut YAG crystal,” *OSA Topical meeting on Advanced Solid-State Lasers 2002, Technical Digest*, WE3 (2002).

J. AMAGAI, H. KUNIMORI, H. KIUCHI and T. TAIRA, “A satellite laser ranging system based on a micro-chip laser,” *CRL International Symposium on Light Propagation and Sensing Technologies for Future Applications, Technical Digest*, March Tokyo, 93–94 (2002).

A. SONE, H. SAKAI, H. KAN and T. TAIRA, “Passively Q-switched high-brightness diode-pumped Nd:YAG micro-lasers,” *CRL International Symposium on Light Propagation and Sensing Technologies for Future Applications, Technical Digest*, March Tokyo, 101–102 (2002).

I. SHOJI and T. TAIRA, “Great reduction of depolarization loss by use of a (110)-cut YAG crystal,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2002*, LongBeach, CA, USA, CTu15, 178–179 (2002).

T. DASCALU, T. TAIRA, N. PAVEL, Y. AOYAGI and J. SAIKAWA, “Continuous-wave low power diode radial pumped microchip composite Yb:YAG laser,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2002*, LongBeach, CA, USA, CWG2, 389–390 (2002).

N. E. YU, J. H. RO, M. CHA, S. KURIMURA and T. TAIRA, “Broad band quasi-matched second harmonic generation in periodically poled lithium niobate at 1550nm,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2002*, LongBeach, CA, USA, CWL6, 420–421 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL, T. TAIRA and A. IKESUE, “CW and passively Q-switched 1064-nm laser emission of concentrated Nd:YAG components under 885-nm diode laser pumping,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2002*, LongBeach, CA, USA, CThO16, 512–513 (2002).

H. ISHIZUKI, S. KURIMURA, M. CHA and T. TAIRA, “Optically monitored poling characteristics of 3 mm-thick MgO:LiNbO₃ crystal,” *Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO 2002*, LongBeach, CA, USA, CFE2, 642 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “Highly efficient 946 CW 946-nm Nd:YAG laser emission under direct 885-nm pumping,” *Technical digest of International Quantum Electronics Conference, IQEC/LAT 2002*, June 22-28, Moscow, QMF2, 237 (2002).

V. LUPEI, N. PAVEL and T. TAIRA, “One-micron laser emission in concentrated Nd:NdVO₄ crystals,” *Technical digest of International Quantum Electronics Conference, IQEC/LAT 2002*, June 22-28, Moscow, QSuR32, 237 (2002).

W. K. JANG, T. TAIRA, T. H. KIM, Y. M. YU and H. S. KIM, “Improved lasing property of neodymium doped lanthanum scandium borate microchip laser,” *Proceedings of SPIE*, 4918, 259–266 (2002).

B-3) 総説、著書

平等拓範, 「光学界の今とこれから～ひろがる光の世界～」, *日本光学会創立50周年記念企画CD-ROM*, 光学 31, 付録 (2002).

池末明生, 平等拓範, 吉田國雄, 「極低散乱を有するNd:YAGセラミックスの製造と多結晶媒質を用いた高性能レーザーの開発」, *Fine Ceramics Report* 20, 192–197 (2002).

T. TAIRA, J. SAIKAWA, T. KOBAYASHI and R. BYER, “Diode-pumped tunable Yb:YAG miniature Lasers at room temperature: modeling and experiment,” SPIE Milestone Series MS173, Tunable Solid-State Lasers, SPIE Optical Engineering Press, 375–379 (2002).

B-4) 招待講演

庄司一郎, 平等拓範, 「セラミックスNd:YAGレーザーの光学的基本特性と展望」, レーザー学会学術講演会第22回年次大会 講演予稿集, 38-39, 大阪, 2002年1月.

平等拓範, 「マイクロチップレーザー」, 第4回光材料・応用技術研究会, 東京, 2002年3月.

平等拓範, 庄司一郎, 池末明生, 「マイクロチップ・セラミックレーザー」, 平成14年電気学会全国大会シンポジウム, 東京, 2002年3月.

T. TAIRA, “Nd-ceramic laser material,” Boeing Co., CA (U. S. A.), May 2002.

T. TAIRA, “Microchip ceramic lasers,” HRL Lab., CA (U. S. A.), May 2002.

T. TAIRA, “Ceramic laser material,” US Army Workshop on Solid-State Lasers, Long Beach (U. S. A.), May 2002.

T. TAIRA, “Ceramic laser material,” Stanford Univ., CA (U. S. A.), May 2002.

T. TAIRA, “The promise of ceramic lasers,” SPRC, Stanford (U. S. A.), September 2002.

T. TAIRA, “Laser performance of transparent ceramics,” Stanford Univ., Ginzton lab., U. S. A., December 2002.

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, 他, 第51回(社)日本金属学会金属組織写真奨励賞(2001).

平等拓範, 他, (社)日本ファインセラミックス協会技術振興賞(2002).

庄司一郎, 第11回(2001年秋季)応用物理学会講演奨励賞(2001).

斎川次郎, 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(1997-1999).

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, 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-).

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 (1999-2001).

平等拓範, 地域連携推進研究(No. 12792003) 研究代表者 (2000-2002).

平等拓範, 科学技術振興調整費(産学官共同研究の効果的な推進) 研究代表者 (2002-).

B-7) 他大学での講義、客員

福井大学工学部, 「電子工学特別講義第三」, 2003年1月9日.

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、波長可変化、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。