

高出力 Yb 添加固体レーザーの現状と今後の展開

宮 永 憲 明

Recent Status of High Power Yb-Doped Solid-State Lasers and Its Prospect

Noriaki MIYANAGA

Advanced applications with high-power-lasers have been stated and the recent status of laser developments with ytterbium-doped materials has been shown. Ytterbium-doped material is the promising high-power-laser material due to its high storage energy, diode pump availability and low thermal loading. The saturation fluencies are, however, too high to extract their storage energies without optics damages. Recent new technologies of both temporal and spatial pulse shaping, laser amplification scheme and architecture improve ytterbium laser performances. Further improvements of these technologies and other novel ones will enable dramatic increases in both pulse energy and average power to open new fields of physics and applications.

Key words: ytterbium-doped material, high power laser, solid-state laser

近年、高出力レーザーを利用して中性子や多価イオンの高強度発生やこれを用いたがん治療¹⁻³⁾、レーザー駆動ガンマ線による核変換⁴⁻⁶⁾、次世代リソグラフィ用高輝度 XUV 光源、レーザー誘雷、宇宙におけるデブリ除去、レーザーロケットなど医療・産業への利用が期待されている。このためには、図1に示すように現状の1桁~2桁以上の平均出力のレーザー開発が必要である。最近、新規のレーザー材料や可変形鏡、SBS 鏡 (stimulated Brillouin scattering) などの位相共役鏡ほかの高機能光学素子が開発され、レーザー光の時間的・空間的な制御技術が大幅に向上した。これにより時空間における局所的なレーザーエネルギーの集中や分散を低減できるようになり、光学系のダメージを起こすことなく高パルスエネルギーと高平均出力が得られるようになってきた。これらの技術はパワーソースであるネオジウム系固体レーザー ($\lambda \sim 1 \mu\text{m}$) にも利用できることから、上述の最先端利用分野だけでなく既存の利用分野への影響も大きい。加えて、超短パルスレーザーの分野においても、チャープパルス増幅法などの増幅方法や広帯域コヒーレント光発生技術、チャープミラーや液

晶空間光変調素子 (SLM)、位相・振幅制御素子 (Dazzler) などの光学素子が開発され、レーザー光の短パルス化や高ピーク強度化がいっそう加速している。現在では、アト秒領域の現象観測や 10^{21} W/cm^2 におよぶ高強度場科学の開拓が現実のものになりつつある。

本稿では、高出力レーザーに焦点を絞り、次世代レーザー材料として研究開発が盛んなイッテルビウム系固体材料について紹介する。さらに、同材料を用いた種々のレーザー開発の現状について、CW レーザー、ナノ秒パルスレーザー、ピコ秒パルスレーザー、フェムト秒パルスレーザーに分けて詳述し、そこから今後の展開を予想する。

1. イッテルビウム系固体レーザー材料

イッテルビウム系固体レーザー材料のエネルギー準位は、図2に示すように大きく2つの準位 (${}^2F_{5/2}$ と ${}^2F_{7/2}$) で構成されている。それぞれのエネルギー準位は上順位が3つ、下準位が4つの副準位にシュタルク分裂しており、レーザー動作は分裂によるエネルギー差を利用する。吸収波長は高出力 LD の発光波長と同じ 900 nm 帯にあり、数十

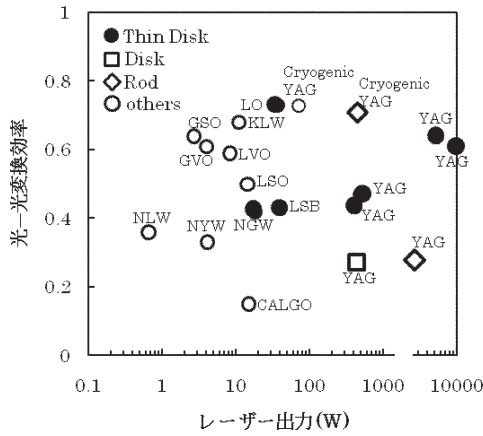


図5 CW レーザー出力と光-光変換効率。

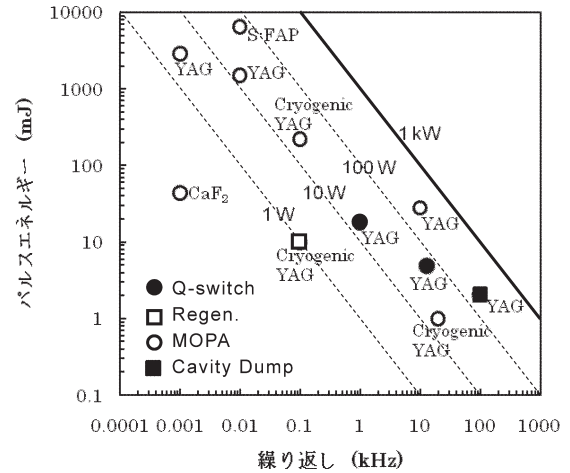


図7 ナノ秒レーザーの繰り返しとパルスエネルギー。

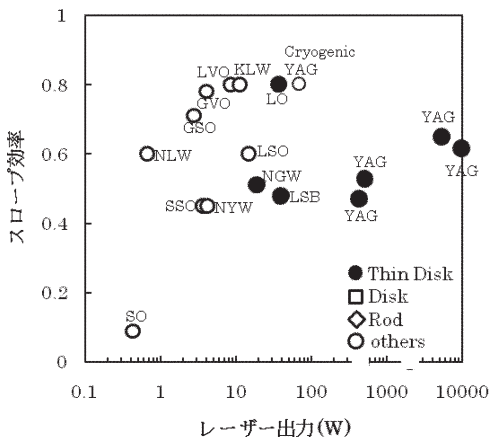


図6 CW レーザー出力とスロープ効率。

適した材料を使うことが重要である。また、飽和フルエンスや熱伝導率は温度によって変化するため、最近では低温に冷却して使用する研究例も少なからずあり、すぐれたレーザー性能を示している⁷⁻¹⁸⁾。

2. レーザーの現状

2.1 CW レーザー

高出力CWレーザーは、金属などの溶接や穴あけなどの精密加工に利用される。近年、ファイバーレーザーのCW発振出力は単一ファイバーでキロワットを超えるようになり、空間ビーム品質や効率が高いことや操作性が容易なことなどから、産業応用での利用が急速に広がりつつある。さらに高出力化するためには、これらのファイバーをバンドル化することで容易に実現できる。隣接するファイバーレーザー間の位相が問題になる場合には、コヒーレント結合が必要となってくる。固体レーザーは出力面でファイバーレーザーにおされつつあるが、1ビームで高出力のコヒーレント光を出すことができ、レーザー出力9.6kW、

光-光変換効率61%を実現している¹⁹⁾。図5, 6に光-光変換効率とスロープ効率をまとめた^{7,18-34)}。100Wを超える出力はおもにYb:YAGによって実現されている。これは、イッテルビウム系固体材料の中で比較的大きな誘導放出断面積と高い熱伝導率をもっているためである。励起光とレーザー光のビーム結合や励起強度、冷却を適切に設定することで、ファイバーレーザー同様70%以上の効率が実現できている。また、液体窒素温度に冷却することで誘導放出断面積の制御と熱耐力の向上を行い、高出力と高効率を同時に実現しており、新しい可能性がみられる。

2.2 ナノ秒レーザー

高出力のナノ秒レーザーはネオジウム系レーザーが主流であり、基本波や二倍高調波を含めるとライダによる環境計測やピーニングなどの表面処理、核融合用レーザーにいたる直接的な利用や、チタンサファイアレーザーの励起源のように間接的な利用を含めて幅広い応用に供するレーザーである。イッテルビウム系レーザーの波長もネオジウム系と同じ $1\mu\text{m}$ であることから、従来の利用分野をそのまま踏襲できる。イッテルビウム系材料の物性値よりさらなる高出力化が期待できることから、新規分野の開拓が期待できる。このためには、高耐力の薄膜技術や高輝度の半導体レーザーの実現など、基盤技術の開発が不可欠である。

図7は、イッテルビウム系固体材料を用いたナノ秒レーザーについて、繰り返しとパルスエネルギーの観点でまとめたものである^{8,15-19,35-37)}。現在達成されている最大平均出力は、繰り返し周波数を問わず約1kWである。レーザー材料内部で多量に発生する熱が制約を与えている。高パルスエネルギー・低繰り返しのレーザー、特に100mJを超えるレーザーはMOPA (master oscillator power

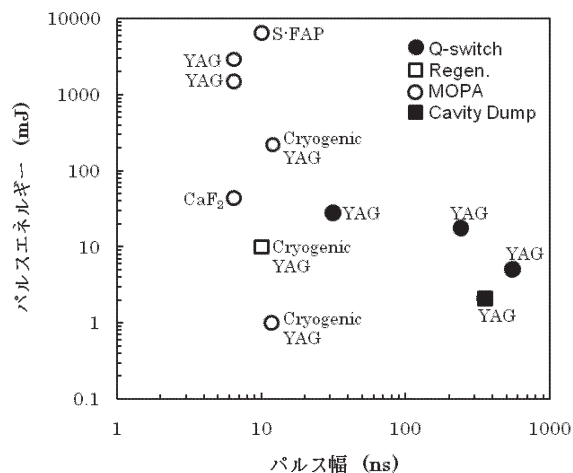


図8 ナノ秒レーザーのパルス幅とパルスエネルギー。

amplifier) システムによって実現している。最大パルスエネルギーは、核融合炉用レーザーの基盤技術として開発された Mercury レーザー (LLNL; Lawrence Livermore National Laboratory) の 65 J である。10 ns の短いパルス幅が要求されることから、MOPA システムを採用している。主増幅器は複数の Yb:S-FAP スラブを用いた 4 パス増幅である。超音速ヘリウムによりレーザー材料を効率よく冷却する工夫をしている。一方、低パルスエネルギー・高繰り返しレーザーの多くは、薄ディスク型増幅器を使用している。数百 μm の極端に短い熱伝搬距離が、レーザーディスクの温度上昇を低くしている。レーザー伝搬方向の利得長がビーム径方向に比べてきわめて短いため高利得を得ることが難しく、CW 動作や高繰り返し動作に適している。数十 kHz 以上の繰り返し動作は通常、音響光学素子 (AOM) を利用するためその立ち上がりは遅く、パルス幅は数百 ns となる (図 8)。

2.3 ピコ秒レーザー

ピコ秒レーザーは蛍光寿命測定、時間分解蛍光スペクトル測定、蛍光寿命イメージ顕微鏡などのバイオ計測や、非熱的な微細加工などの先端研究に利用される。また、最近では、コヒーレント白色光を利用した数 fs のレーザー光、いわゆる“数サイクルパルス”によるペタワット出力の研究において、光パラメトリック増幅の励起源として高出力のピコ秒レーザーが熱望されている。イッテルビウム系固体材料はネオジウム系材料に比べて蛍光スペクトル幅が広く、Yb:YAG でも 10 nm 程度の広い蛍光スペクトルを有している。これらのスペクトル幅はフェムト秒パルスの増幅も可能であることから、チャープパルス増幅後にピコ秒に圧縮することで、パルスの時間伸長・圧縮を容易にできる利点がある。したがって、チャープパルス増

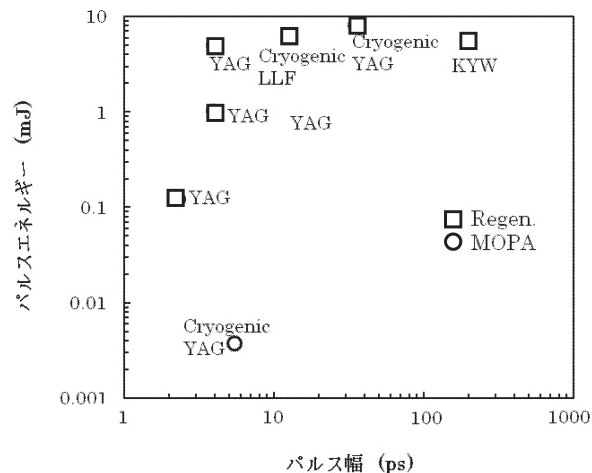


図9 ピコ秒レーザーのパルス幅とパルスエネルギー。

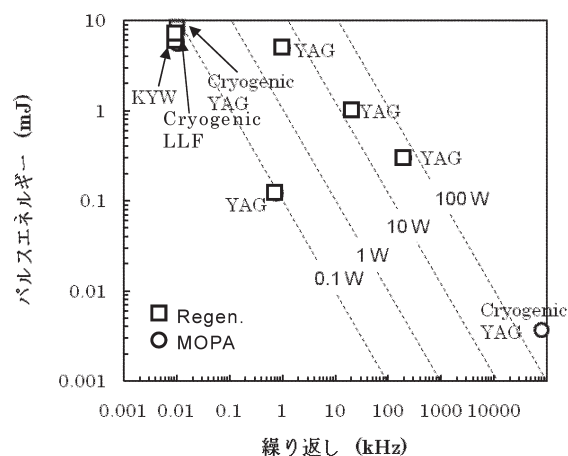


図10 ピコ秒レーザーの繰り返しとパルスエネルギー。

幅 (CPA) を利用する高パルスエネルギーの増幅はナノ秒レーザーの場合と同じで、レーザー基盤技術の開発に依存する。図 9 は、イッテルビウム系材料を用いた高パルスエネルギーを有するピコ秒レーザーのパルス幅を示す^{15-18,38)}。Yb:YAG を使って <10 ps、数 mJ の超短パルス・高パルスエネルギーのレーザーが得られている。また、冷却 Yb:YAG を利用して、287 W の高い平均出力を得ている (図 10)¹⁸⁾。

2.4 フェムト秒レーザー

2.4.1 発振器

モードロックチタンサファイアレーザーの開発以降、フェムト秒パルスが簡単に入手できるようになり、トンネルイオン化、高次高調波発生、コヒーレント制御、光コムなど、研究をはじめとして医療、産業にわたる幅広い領域で新規の分野を開拓し、今では一般的なツールになっている。イッテルビウム系固体材料は、前述したように数十

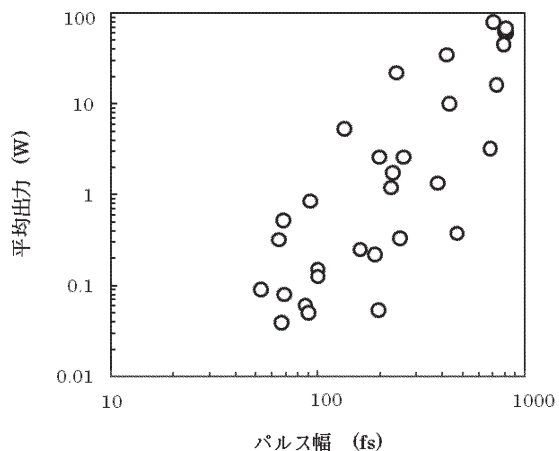


図11 フェムト秒レーザー発振器の平均出力. ホスト材料: YAG, KYW, glass, KGW, $\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$, YAlO_3 , $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, Sc_2O_3 , Lu_2O_3 , Y_2O_3 , CaF_2 , YLF, $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$, CaGdAlO , $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{BO}_3)_3$, Y_2SiO_5 , Lu_2SiO_5 .

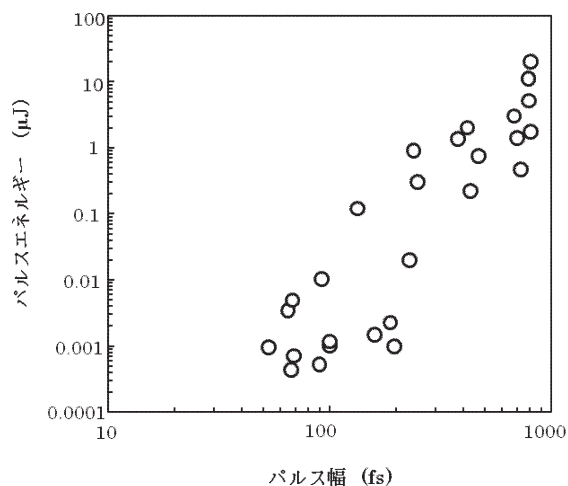


図12 フェムト秒レーザー発振器のパルスエネルギー. ホスト材料: YAG, KYW, glass, KGW, $\text{LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$, YAlO_3 , $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, Sc_2O_3 , Lu_2O_3 , Y_2O_3 , CaF_2 , YLF, $\text{NaY}(\text{WO}_4)_2$, CaGdAlO , $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{BO}_3)_3$, Y_2SiO_5 , Lu_2SiO_5 .

nm の蛍光スペクトル幅を有しているために、半導体レーザー直接励起によるフェムト秒発振器の開発が盛んである。加えて、半導体過飽和吸収ミラー (SESAM) が発明されたことで複雑なモードロッカーは必要なくなり、フェムト秒発振器の開発はいっそう加速した。さらに、イッテルビウム系固体材料はホスト材料がさまざまに選べるため、これまでに数多くのモードロック発振器が開発されている。現在では、平均出力の向上、パルスエネルギーの増加、超短パルス化が精力的に研究されており、今後もしばらく続くものと思われる。

レーザー媒質として薄ディスクが開発された後、平均

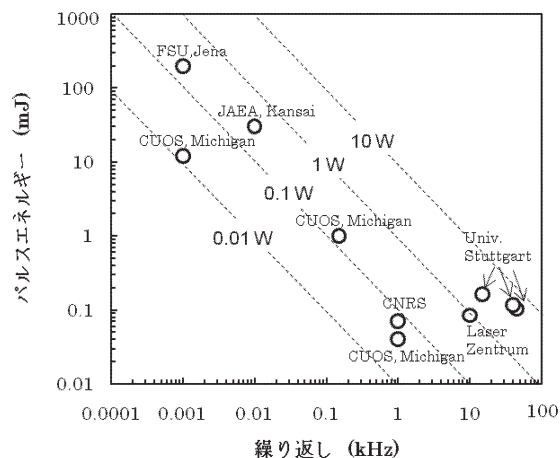


図13 フェムト秒レーザーの増幅パルスエネルギーと繰り返し. ホスト材料: YAG, KYW, CaF_2 , cryogenic YLF, GdCOB , $\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_2$.

出力は 80 W (パルスエネルギー $1.4 \mu\text{J}$, 繰り返し周波数 57 MHz, パルス時間幅 705 fs) に達している (図 11)³⁹⁻⁵². パルスエネルギーも $20 \mu\text{J}$ (繰り返し周波数 3.4 MHz, 平均出力 68 W, パルス時間幅 811 fs) が得られ, 再生増幅器などの初段増幅が不要なまでになっている (図 12). 一方で, 超短パルス化は進み 53 fs (パルスエネルギー 0.95 nJ, 繰り返し周波数 96 MHz, 平均出力 90 mW) が得られている. フェムト秒発振器においてもファイバーレーザーはライバルであり, 28 fs のパルス幅を達成している. しかし, 固体レーザーのような高パルスエネルギー化は, シングルモードファイバー内の非線形過程のため難しいと思われる.

2.4.2 フェムト秒パルスの高パルスエネルギー化

高エネルギーフェムト秒パルスの高強度場を利用した相対論や非線形量子電磁力学 (QED), 真空からの電子対生成など, 興味ある実験による物理検証が数多くある. 世界的にも, ELI (Extreme Light Infrastructure) などの大型プロジェクトが立ち上がろうとしている. 一方で, レーザー駆動中性子源や多価イオン源とこれらを用いたがん治療, 次世代リソグラフィ用 EUV 光源などの産業応用のためには, 高い繰り返しが必要である.

図 13 に, これまで開発された高出力のイッテルビウム系フェムト秒レーザーのパルスエネルギーと繰り返しをまとめた^{19,53-59}. FSU (Jena) 以外はすべて再生増幅器である. また, シュツットガルト大学は 500 fs のシード光を直接再生増幅しており, その他は CPA である. FSU (Jena) は, アクティブミラー型 $\text{Yb}:\text{CaF}_2$ 結晶を主増幅器に用いた MOPA 構成により, 197 mJ (192 fs) の高パルスエネルギーを達成している. 1 Hz の低い繰り返しは,

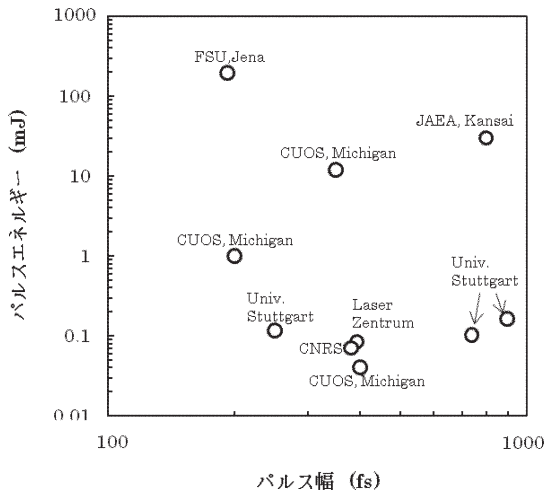


図14 フェムト秒レーザーの増幅パルスエネルギーとパルス幅。宿主材料：YAG, KYW, CaF₂, cryogenic YLF, GdCOB, SrY₄(SiO₄)₂。

レーザー材料内に発生する熱が原因である。一方、シュツットガルト大学は、高繰り返し再生増幅器により100 μ J 程度のパルスエネルギーで高繰り返し動作し、平均出力4.5 Wを実現している。パルス幅はすべて数百 fs であるが、多くは分散補正が不十分であり、広帯域の増幅能力を有している(図14)。また、これらのうちいくつかは、100 fs 以下を達成できるスペクトル幅を有している。

3. 技術開発の問題点と今後の展開

イッテルビウム系材料は飽和フルーエンスが光学系のダメージ閾値より大きな場合が多く、レーザーのエネルギーフルーエンスを上げることができない。したがって、効率よいエネルギー引き出しができないばかりでなく、パルスエネルギーの増加は従来同様のエネルギーフルーエンスでレーザー口径を大きくすることになり、システムの小型化は困難である。今後の高パルスエネルギー化は、高エネルギーフルーエンスでの動作が不可欠になると考えられる。したがって、高耐力の光学薄膜技術の開発は、Yb系材料にとって最も必要な基盤技術開発のひとつである。また、半導体レーザーの高輝度化は、従来よりYb系材料の高強度励起のために強く要望されてきた。高強度励起による利得増大は、効率やレーザー利得帯域を大きく改善する。近年、ファイバーレーザー励起用のために、高輝度の半導体レーザー開発が進んでいる。米国では、DARPA (US Defence Advance Research Projects Agency) のSHEDS (Super High Efficiency Diode Sources) 計画により、高性能半導体レーザー開発が行われた。さらに、マイクロオプティクスに代表される光学技術の進歩により、ファイバ

ー結合型半導体レーザーのような高輝度の励起光源が実現されている。レーザーシステムの光学系では、波面補正技術として可変形鏡やSBSなどの位相共役鏡の役割は大きい。また、超短パルスレーザーにおいては、液晶空間光変調素子(SLM)や位相・振幅制御素子(Dazzler)などの光学素子が開発され、時空間におけるレーザー光の整形が容易にできるようになった。これらの技術は最先端のレーザーに装備されつつあり、今後、広く活用することで、従来にはない高パルスエネルギーと高平均出力を兼ね備えたレーザーシステムが構築できるものと期待している。

イッテルビウム系固体材料を用いた高出力レーザーについてCWレーザー、ナノ秒レーザー、ピコ秒レーザー、フェムト秒レーザーに分けて開発現状を述べた。イッテルビウム系材料は高出力レーザー材料の特徴を有しているが、高すぎる飽和フルーエンスや準三準位構造などが原因で、高いエネルギーフルーエンス動作が不可欠である。これまで光学系のダメージにより本来の性能を出し切れていなかったが、最近の時空間におけるパルス制御技術やレーザー媒質構造、増幅方式など新規の基盤技術により改善されつつある。今後、イッテルビウム系材料が本来有しているすぐれた高出力レーザー特性を引き出せるかどうかは、これらの技術の熟成と新規技術の開拓にかかっている。高パルスエネルギーと高平均出力の増大によって検証・実現できる魅力的な物理研究や応用研究は数多くある。大いに期待したい。

文 献

- 1) 山田 聡：“加速器によるがん治療の最前線”，日本物理学会誌，**61** (2006) 401-407.
- 2) レーザー学会編：39章“治療”，レーザーハンドブック，第2版(オーム社，2005) p. 981.
- 3) 田村 守：光による医学診断(共立出版，2001).
- 4) 今崎一夫：“レーザー光子-電子散乱による高エネルギー放射光とその利用”，レーザー研究，**27** (1999) 14-19.
- 5) J. Magill, H. Schwoere, F. Ewald, J. Galy, R. Schenkel and R. Sauerbrey: “Laser transmutation of iodine-129,” Appl. Phys. B, **77** (2003) 387-390.
- 6) K. W. D. Ledingham, J. Magill, P. McKenna, J. Yang, J. Galy, R. Schenkel, J. Rebizant, T. McCanny, S. Shimizu, L. Robson, R. P. Singhal, M. S. Wet, S. P. D. Mangles, P. Nilson, K. Krushelnick, R. J. Clarke and P. A. Norreys: “Laser-driven photo-transmutation of ¹²⁹I—A long-lived nuclear waste product,” J. Phys. D, Appl. Phys., **36** (2003) L79-L82.
- 7) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima and Y. Izawa: “Sapphire-conductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers,” Appl. Phys. B, **80** (2005) 635-638.
- 8) S. Tokita, J. Kawanaka, Y. Izawa, M. Fujita and T.

- Kawashima: "23.7-W picosecond cryogenic-Yb:YAG multi-pass amplifier," *Opt. Express*, **15** (2007) 3955-3961.
- 9) J. Kawanaka, H. Nishioka, N. Inoue and K. Ueda: "Tunable continuous-wave Yb:YLF laser operation with a diode-pumped chirped-pulse amplification system," *Appl. Opt.*, **40** (2001) 3542-3546.
 - 10) J. Kawanaka, K. Yamakawa, H. Nishioka and K. Ueda: "Improved high-field laser characteristics of a diode-pumped Yb:LiYF₄ crystal at low temperature," *Opt. Express*, **10** (2002) 455-460.
 - 11) J. Kawanaka, K. Yamakawa, H. Nishioka and K. Ueda: "30-mJ, diode-pumped, chirped-pulse Yb:YLF regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 2121-2123.
 - 12) T. Shoji, S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita and Y. Izawa: "Quantum-defect-limited operation of diode-pumped Yb:YAG laser at low temperature," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L496-L498.
 - 13) J. Kawanaka, S. Tokita, H. Nishioka, M. Fujita, K. Yamakawa, K. Ueda and Y. Izawa: "Dramatically improved laser characteristics of diode-pumped Yb-doped materials at low temperature," *Laser Phys.*, **15** (2005) 1306-1312.
 - 14) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima and Y. Izawa: "Efficient high-average-power operation of Q-switched cryogenic Yb:YAG laser oscillator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) L1529-L1531.
 - 15) Y. Akahane, M. Aoyama, A. Sugiyama, R. Kudo, K. Ogawa, K. Tsuji and K. Yamakawa: "High-energy diode-pumped picosecond regenerative amplification at 999 nm in wavelength with a cryogenically cooled Yb:LuLiF₄ crystal," *Opt. Lett.*, **33** (2008) 494-496.
 - 16) K. Ogawa, Y. Akahane, M. Aoyama, K. Tsuji, S. Tokita, J. Kawanaka, H. Nishioka and K. Yamakawa: "Multi-millijoule, diode-pumped, cryogenically-cooled Yb:KY(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifier," *Opt. Express*, **15** (2007) 8598-8602.
 - 17) Y. Akahane, M. Aoyama, K. Ogawa, K. Tsuji, S. Tokita, J. Kawanaka, H. Nishioka and K. Yamakawa: "High-energy, diode-pumped, picosecond Yb:YAG chirped-pulse regenerative amplifier for pumping optical parametric chirped-pulse amplification," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1899-1901.
 - 18) T. Y. Fan, D. J. Rippin, R. L. Aggarwal, J. R. Ochoa, B. Chann, M. Tilleman and J. Spitzberg: "Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 448-459.
 - 19) A. Giesen and J. Speiser: "Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 598-609.
 - 20) T. Taira: "RE³⁺-ion-doped YAG ceramic lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 798-809.
 - 21) M. Tsunekane and T. Taira: "High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb:Y₃Al₅O₁₂ microchip laser," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 121101.
 - 22) Y. A. Zakharenkov, T. O. Clatterbuck, V. V. Shkunov, A. A. Betin, D. M. Filgas, E. P. Ostby, F. P. Strohkendl, D. A. Rockwell and R. S. Baltimore: "2-kW average power CW phase-conjugate solid-state laser," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13** (2007) 473-479.
 - 23) C. Krankel, J. Johannsen, R. Peters, K. Petermann and G. Huber: "Continuous-wave high power laser operation and tunability of Yb:LaSc₃(BO₃)₄ in thin disk configuration," *Appl. Phys. B*, **87** (2007) 217-220.
 - 24) R. Peters, C. Krankel, K. Petermann and G. Huber: "Power scaling potential of Yb:NGW in thin disk laser configuration," *Appl. Phys. B*, **91** (2008) 25-28.
 - 25) J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, E. Cormier, J. Petit, P. Goldner and B. Viana: "Continuous-wave and femtosecond laser operation of Yb:CaGdAlO₄ under high-power diode pumping," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1962-1964.
 - 26) J. Lu, J. F. Bisson, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Yb³⁺:Sc₂O₃ ceramic laser," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 1101-1103.
 - 27) H. Bruesselbach and D. S. Sumida: "A 2.65-kW Yb:YAG single-rod laser," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11** (2005) 600-603.
 - 28) M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, D. ViVien and B. Ferrand: "Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping," *Appl. Phys. B*, **80** (2005) 171-176.
 - 29) L. Zheng, J. Xu, G. Zhao, L. Su, F. Wu and X. Liang: "Bulk crystal growth and efficient diode-pumped laser performance of Yb³⁺:Sc₂SiO₅," *Appl. Phys. B*, **91** (2007) 443-445.
 - 30) G. Q. Xie, D. Y. Tang, H. J. Zhang, J. Y. Wang and L. J. Qian: "Efficient operation of a diode-pumped Yb:NaY(WO₄)₂ laser," *Opt. Express*, **16** (2008) 1686-1691.
 - 31) J. Liu, X. Mateos, H. Zhang, J. Wang, M. Jiang, U. Griebner and V. Petrov: "Characteristics of a continuous-wave Yb:GdVO₄ laser end pumped by a high-power diode," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2580-2583.
 - 32) J. Liu, V. Petrov, H. Zhang, J. Wang and M. Jiang: "High-power laser performance of a-cut and c-cut Yb:LuVO₄ crystals," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 3294-3296.
 - 33) J. Liu, V. Petrov, X. Mateos, H. Zhang and J. Wang: "Efficient high-power laser operation of Yb:KLu(WO₄)₂ crystals cut along the principal optical axes," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2016-2018.
 - 34) C. Yan, G. Zhao, L. Zhang, J. Xu, X. Liang, D. Juan, W. Li, H. Pan, L. Ding and H. Zeng: "A new Yb-doped oxyorthosilicate laser crystal: Yb:Gd₂SiO₅," *Solid State Commun.*, **137** (2006) 451-455.
 - 35) M. Siebold, M. Hornung, S. Bock, J. Hein, M. C. Kaluza, J. Wemans and R. Uecker: "Broad-band regenerative laser amplification in ytterbium-doped calcium fluoride (Yb:CaF₂)," *Appl. Phys. B*, **89** (2007) 543-547.
 - 36) M. Siebold, J. Hein, C. Wandt, S. Klingebiel, F. Krausz and S. Karsch: "High-energy, diode-pumped, nanosecond Yb:YAG MOPA system," *Opt. Express*, **16** (2008) 3674-3679.
 - 37) J. Liu, V. Petrov, H. Zhang, J. Wang and M. Jiang: "Efficient passively Q-switched laser operation of Yb in the disordered NaGd(WO₄)₂ crystal host," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1728-1730.
 - 38) C. Honninger, I. Johannsen, M. Moser, G. Zhang, A. Giesen and U. Keller: "Diode-pumped thin-disk Yb:YAG regenerative amplifier," *Appl. Phys. B*, **65** (1997) 423-426.
 - 39) T. Sudmeyer, S. V. Marchese, S. Hashimoto, C. R. E. Baer, G. Gingras, B. Witzel and U. Keller: "Femtosecond laser oscillators for high-field science," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 599-604.
 - 40) G. R. Holtom: "Mode-locked Yb:KGW laser longitudinally pumped by polarization-coupled diode bars," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 2719-2721.
 - 41) V. Petrov, U. Griebner, D. Ehrt and W. Seeber: "Femto-

- second self mode locking of Yb:fluoride phosphate glass laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 408-410.
- 42) S. Rivier, U. Griebner, V. Petrov, H. Zhang, J. Li, J. Wang and J. Lin: "Sub-90 fs pulses from a passively mode-locked Yb:YAl₃(BO₃)₄ laser," *Appl. Phys. B*, **93** (2008) 753-757.
 - 43) M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb³⁺:Sc₂O₃ ceramic laser," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 3382-3384.
 - 44) M. Tokurakawa, K. Takaichi, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani and A. A. Kaminskii: "Diode-pumped 188 fs mode-locked Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic laser," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 071101.
 - 45) A. Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J. L. Doualan and R. Moncorge: "High-power diode-pumped Yb³⁺:CaF₂ femtosecond laser," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2767-2769.
 - 46) N. Coluccelli, G. Galzerano, L. Bonelli, A. D. Lieto, M. Tonelli and P. Laporta: "Diode-pumped passively mode-locked Yb:YLF laser," *Opt. Express*, **16** (2008) 2922-2927.
 - 47) A. Garcia-Gortes, J. M. Cano-Torres, X. Han, C. Cascales, C. Zaldo, X. Mateos, S. Rivier, U. Griebner, V. Petrov and F. J. Valle: "Tunable continuous wave and femtosecond mode-locked Yb³⁺ laser operation in NaLu(WO₄)₂," *J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 063110.
 - 48) A. Garcia-Gortes, J. M. Cano-Torres, M. D. Serrano, C. Cascales, C. Zaldo, S. Rivier, X. Mateos, U. Griebner and V. Petrov: "Spectroscopy and lasing of Yb-doped NaY(WO₄)₂: Tunable and femtosecond mode-locked laser operation," *IEEE J. Quantum Electron.*, **43** (2007) 758-764.
 - 49) J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, E. Cormier, J. Petit, P. Goldner and B. Viana: "Continuous-wave and femtosecond laser operation of Yb:CaGdAlO₄ under high-power diode pumping," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1962-1964.
 - 50) F. Druon, S. Chenais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaume, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, J. P. Chambaret, S. Mohr and D. Kopf: "Largely tunable diode-pumped sub-100-fs Yb:BOYS laser," *Appl. Phys. B*, **74** (2002) S201-S203.
 - 51) G. Paunescu, J. Hein and R. Sauerbrey: "100-fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser," *Appl. Phys. B*, **79** (2004) 555-558.
 - 52) F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, Y. Zaouter, M. Jacquemet and P. Georges: "Efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ high-power femtosecond laser operation," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 1555-1557.
 - 53) C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell, M. A. Emanuel, J. Skidmore, C. A. Ebbers, S. B. Sutton and K. S. Jancaitis: "High-average-power 1- μ m performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (1998) 2010-2019.
 - 54) P. Raybaut, F. Balembois, F. Druon and P. Georges: "Numerical and experimental study of gain narrowing in ytterbium-based regenerative amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **41** (2005) 415-425.
 - 55) F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, S. W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, G. Cheriaux, J. P. Chambaret, G. Aka and D. Vivien: "12-mJ, 350-fs Yb:GdCOB regenerative amplifier," *Opt. Commun.*, **199** (2001) 181-187.
 - 56) S. Ito, T. Nakajyo, T. Yanagida, F. Sakai, A. Endo and K. Torizuka: "Diode-pumped, chirped-pulse Yb:S-FAP regenerative amplifier for laser-Compton X-ray generation," *Opt. Commun.*, **259** (2006) 812-815.
 - 57) H. Liu, S. Biswal, J. Paye, J. Nees, G. Mourou, C. Honninger and U. Keller: "Directly diode-pumped millijoule subpicosecond Yb:glass regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 917-919.
 - 58) H. Liu, J. Nees and G. Mourou: "Directly diode-pumped Yb:KY(WO₄)₂ regenerative amplifiers," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 722-724.
 - 59) M. Siebold, M. Hornung, R. Boedefeld, S. Podleska, S. Klingebiel, C. Wandt, F. Krausz, S. Karsch, R. Uecker, A. Jochmann, H. Hein and M. C. Kaluza: "Terawatt diode-pumped Yb:CaF₂ laser," *Opt. Lett.*, **33** (2008) 2770-2772.

(2008年12月1日受理)