

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340104

研究課題名（和文）フェムト秒 Yb 添加セラミックレーザー光源の最短パルス高強度化研究

研究課題名（英文）High-power ultrashort pulse laser source based on Yb-doped ceramic material

研究代表者 植田 憲一 (UEDA KENICHI)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：10103938

研究成果の概要（和文）：複数の Yb 利得媒質を用いた複合利得媒質セラミック超短パルスレーザーを開発し、約 53fs のパルス幅で 1 W 以上の出力を得た。また高出力化の為に薄型ディスクレーザーを開発し、連続発振で 70 W 出力が得られた。超短パルスレーザー構築・評価の為に各種計算コードの開発も行った。

研究成果の概要（英文）：53-fs pulses with above 1-W average power were obtained from combined Yb doped active gain media ceramic laser. 70-W average power continuous laser operation was achieved based on thin-disk laser system. Numerical simulation codes to calculate and evaluate ultra-short pulse laser operation were also constructed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：薄型ディスクレーザー、カーレンズモード同期、LD 励起超短パルスレーザー

1. 研究開始当初の背景

高出力超短パルス光源は理化学研究の応用のみならず、産業応用、例えば非熱超微細加工、透明材料の三次元加工などが考えられている。Yb 添加媒質を用いた超短パルスレーザー光源は、安価で高出力な次世代超短パルス光源の最有力候補と期待されている。

我々は Yb 添加媒質を用いた超短パルスレーザー光源の開発を 2000 年から継続して行っており、近年は特に Yb 添加希土類三二酸化物(Re₂O₃, Re=Y, Lu, Sc)系セラミック媒質を用いた超短パルスレーザー光源の研究開発を行ってきた。希土類三二酸化物は商業用固体レーザーに広く用いられている Y₃Al₅O₁₂(YAG)や KY(WO₄)₂(KYW)と比べ、前

者に対しては約 1.5 倍の熱伝導率と約 2 倍の蛍光自然幅を有し、後者に対しては約 4 倍の熱伝導率と約半分の蛍光自然幅を有している(次頁表 1)。そのため高出力レーザーへの応用は期待できるが 100 fs を切るような超短パルスレーザーへの応用は難しいと考えられていた。しかし我々は本研究を開始した時点において、カーレンズモード同期共振器を利用することにより Yb 添加希土類三二酸化物を用いて 1W 程度の中出力動作において、限界と考えられていたパルス幅 100 fs を超える超短パルスレーザー動作に成功していた。この大幅な性能の向上は前述のカーレンズ効果を用いてレーザー共振器に非常に大きな損失・利得変調を加えた事によるところが大

表 1. Yb 添加希土類酸化物 (Yb:Re₂O₃, Re=Y, Lu, Sc) と Yb:YAG, Yb:KYW との比較

媒質	Y ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	YAG	KYW
熱伝導率 (W/mK)	13.6	10.9	12.5	9.9	3.5
自然蛍光幅 (nm)	15	13.5	11.5	8.5	~25
フーリエ限界パルス幅(fs)	74	86	99	139	44
本研究以前のパルス幅	188	210	220	335	71
本研究のパルス幅	68	68	64	120	

きいと考えられていたが、定性的な物理から予測される議論内にとどまっていおり、定量的な評価が望まれていた。また研究開始当時、単結晶材料を用いた超短パルスレーザーに比べ我々のカーレンズモード同期超短パルスセラミックレーザーの性能が遥かに優れていた為、同様の動作が単結晶媒質を用いても可能かという高い関心が存在していた。

2. 研究の目的

本研究においては、我々が培ってきた超短パルス技術に新たに高出力レーザー技術を加えて、高出力超短パルスレーザー光源の開発を目指した。また本研究で開発する高出力レーザー技術は、超短パルスレーザー発振器への応用のみならず、多種の科学技術研究および産業応用の為、我が国の高出力固体レーザー光源開発（高出力 CW 発振器、CW 増幅器、超短パルス増幅器）における基盤技術に繋がる事を期待した。

高出力化 (>10W) を目指すにあたり、具体的な目的課題を挙げると以下ようになる。**(1) ①既存の共振器構成を用いたの実験の最適化、②セラミック媒質と単結晶媒質との比較、③新材料を用いたレーザー開発。(2) ①熱レンズ効果、及び非線形カーレンズ効果を考慮した共振器条件計算コード開発、②超短パルスレーザー動作の定量的な計算コード開発、(3) 熱効果と非線形レンズ効果の影響を抑制する為の新規レーザーシステム (薄型ディスクレーザー) 開発。**以下上記項目について記述していく。

3. 研究の方法

(1) ①既存の共振器構成を用いたの実験の最適化。同一共振器内で異なる二つの Yb 添加媒質、Yb³⁺:Y₂O₃ と Yb³⁺:Sc₂O₃ を同時に用いた非線形効果と、利得帯域幅の制御を行った複合利得媒質セラミックレーザーについて最適化を行った。利得特性の大きく異なるレーザー媒質を同一共振器内で同時に用いると、レーザー発振の競合が起こりやすく安定な超短パルス発振は得がたいとされていたが、Yb 添加希土類三二酸化物同士では比較的蛍光のピークが近く、蛍光断面積の値も近い為、適切な複合比で用いる事により(図 1)、広帯

域で平坦な利得の利用を可能とし実験を行った。また Broad stripe LD 励起において十分なカーレンズ効果を得るために共振器の非点収差を調整し、更にレーザー共振器を不安定状態に近い状態で動作させた。この共振器については後述の(2)①の共振器計算コードを用いて計算を行いカーレンズ効果の大きさの評価も行った。

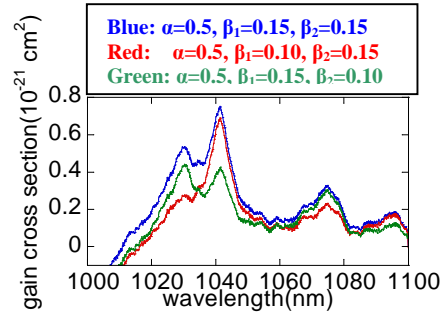


図 1. Yb³⁺:Y₂O₃ と Yb³⁺:Sc₂O₃ 単体、及び同時に用いた時の利得断面積。α は Y₂O₃ の量、(1-α) は Sc₂O₃ の量、β は反転分布の大きさを示す

②セラミック媒質と単結晶媒質の比較。単結晶 Yb 添加希土類三二酸化物 Yb³⁺:Lu₂O₃、Yb³⁺:Sc₂O₃ をドイツハンブルグ大学 Huber 研より入手し、Yb³⁺:Y₂O₃ セラミックと共に、ほぼ同一な共振器条件で実験を行い超短パルスレーザー動作時の特性を比較した。また関連して Lu₂O₃ セラミック材料の機械強度測定も行った。各種材料の非線形定数の測定も行った。

③新材料を用いたレーザー開発。神島化学工業との共同研究により、新規セラミック材料 Yb³⁺:(YGd₂)Sc₂(GaAl₂)O₁₂ disordered について分光特性を評価し、さらに半導体可飽和吸収体モード同期発振、カーレンズモード同期発振を行った。この媒質はガーネット系の結晶構造(図 2)を有し、優れた機械強度及び熱特性が期待できる。またその Disorder 構造により利得帯域が広帯域化し易く、希土類三二酸化物にならんで高出力超短パルスレーザー光源用の利得媒質として期待できる。

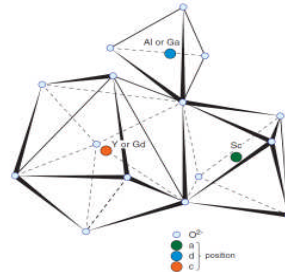


図 2. (YGd₂)Sc₂(GaAl₂)O₁₂ の結晶構造

(2) ①熱レンズ効果、及びカーレンズ効果を考慮した共振器条件計算コード開発。計算方法としては一般的な ABCD 行列を基礎とし、静的な光学機器を示す行列に加えて、熱レンズ効果(結晶中での温度分布から発生す

るレンズ効果)、カーレンズ効果(レーザー光軸上断面の電界強度分布から発生するレンズ効果)を示す行列を導入した。また非線形カーレンズ効果は共振器条件によって決まるビーム径によって大きく影響を受けるので(図3)、各々にフィードバックをかけて解が収束するまで行列計算をループさせる事により求めた。

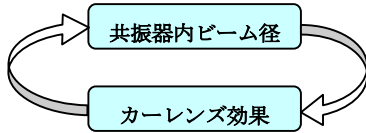


図3. 共振器内ビーム径とカーレンズ効果の依存性

②超短パルスレーザー動作の定量的な計算コード開発。任意の共振器中における超短パルス動作の可能性を評価する為、共振器中のパルス光の振る舞いを示す非線形シュレーディンガー方程式を、スプリットステップフーリエ法(SSF)と呼ばれる方法を用いて計算した。SSFではフーリエ変換により時間領域においては、カーレンズ効果による利得損失変調効果及び自己位相変調効果によるスペクトルの広帯域化の影響を計算し、周波数領域においては利得媒質によるスペクトルの変化及び媒質の分散効果による影響を計算している。この計算コードを使い、共振器の分散、自己位相変調、カーレンズ効果による変調深さ、利得幅などをパラメータとして変化させたときの共振器内パルスの振る舞い計算を行った。

(3) 熱効果と非線形レンズ効果の影響を抑制する為の新規レーザーシステム(薄型ディスクレーザー)開発。超短パルスレーザー光源を高出力化させるために薄型ディスクレーザーの開発を行った。薄型ディスクレーザーでは利得媒質を薄くし、それをヒートシンクに直接接合し、1次元方向への排熱を可能とする事により、利得媒質内で発生する非線形効果と熱に起因する諸問題を軽減する事が可能となる。利得媒質とヒートシンクの接合には InSn 半田を用いる事とした。InSn は AuSn 半田などに比べて融点が低く、濡れ性が高い為比較的容易に媒質とヒートシンクの接合がおこなえる。接合後の利得媒質は自作の干渉計を用いて波面の歪みを励起時、非励起時に測定し、十分に効率的な冷却が行われている事を確認した。ヒートシンクは利得媒質接合部の背面部に凹凸の微細構造を取り付け、そこに冷却用の水流を垂直にあてて乱流を発生させることにより、効率的な排熱が行えるようにした。結晶の励起方法としては16回(写真1)または24回のマルチパス励起システムを用いている。また薄型ディスクレーザーでは非線形効果(自己位相変調効果によるスペクトル広がり)の効果が抑制

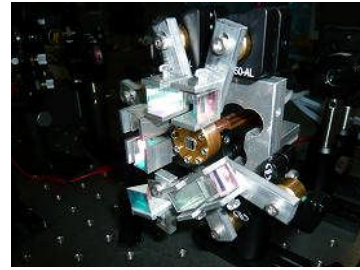


写真1. 16パスマルチ励起システム

される為、超短パルス動作が制限される事が考えられた為、それについて(2)②の計算コードを用いて評価した。

(4) 上記以外に並行して行った研究。

径偏光レーザーやラゲールガウシアンモードレーザーは、その得意な偏光特性から加工分野や医療分野において様々な応用が考えられるようになってきている。超短パルスレーザーにおいても径偏光モードで発振できないかというような要望が以前より存在していた為、これら発振モードのレーザー研究も行った。偏光特性の制御はフォトニック結晶ミラーや共振器内部に大きな球面収差を有するレンズを配置する事により行い、利得媒質にはマイクロチップやファイバー媒質を用いた。

4. 研究成果

(1) ①既存の共振器構成を用いたの実験の最適化。安価なLD直接励起という条件の下、パルス幅 53 fs、出力 1 W、及びパルス幅 66 fs、出力 1.5 W を得るに至った[論文4]。これは2009年までに報告されていた全ての Yb 添加系結晶におけるサブ 100 fs 超短パルスレーザー光源におけるの最大出力であり、また Ti:Al₂O₃ レーザー励起を含め、Yb 添加固体レーザーの共振器からの直接発生における世界最短パルスの発生に成功した。さらに効率においても他の報告を大きく凌駕している(図4)。Yb 添加系材料では困難と考えられていた 100 fs 以下の短パルス領域で高出力、高効率発振を実証し、Yb 添加固体レーザーの性能を一躍向上させることとなった。これら

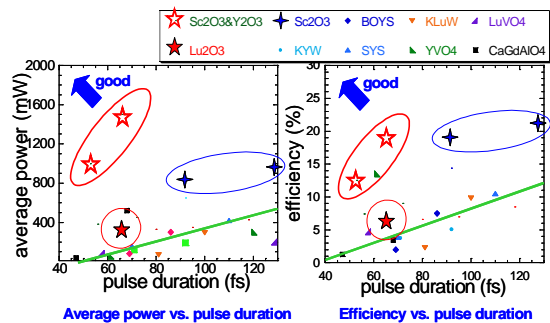


図4. これまで報告されている様々なモード同期 Yb 添加固体レーザーの平均出力(左)および光-光変換効率(右)をパルス幅に対してプロットしたもの。左上に行くほど望ましく、円で囲まれたデータが我々の結果を示す。

の結果はまだ最適化の余地があり、特に共振器構成を大きく帰ることにより、一層の高出力化、高効率化、短パルス化が見込まれる。
②セラミック媒質と単結晶媒質との比較。単結晶、セラミックすべてにおいて出力 500mW 以上で 70fs 以下の超短パルス発生に成功した(表 2)。これにより短パルス発生においては単結晶とセラミックに大きな差は存在しない事がわかったが、今後のより一層の高出力化を進めていく上ではセラミック材料のサイズ拡大則と高い熱破壊閾値が有利に働くと考えられる。さらに最適化を進めることにより 80fs 以下のパルス幅で 1W 以上の出力を得ることに成功した[論文 2]。また、このときモード同期発振の長期安定性も評価し数時間以上にわたり安定に発振できる事を確認した。

表 2. 同一共振器を用いた、単結晶とセラミックでの超短パルスレーザー発振結果

Material	Δt (fs)	P (mW)	Pump
Sc ₂ O ₃ crystal	64	640	Fiber Coupled LD
Lu ₂ O ₃ crystal	68	540	Fiber Coupled LD

③新材料を用いたレーザー開発。
 Yb³⁺:(YGD₂)Sc₂(GaAl₂)O₁₂ disordered)は同様のガーネット構造のYAGと比べて約1.5倍の利得帯域を有している事が分かった。モード同期を発振実験においては出力 820 mW、パルス幅 69fs を得るに至った。また短パルスを進めていくにあたり発振スペクトルの長波長方向へのシフトが確認された(図 5)[論文 3]。この現象は後述の計算機コード(2)②を用いても確認する事ができた。

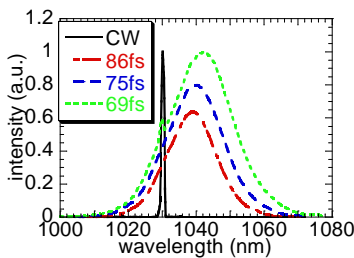


図 5 Yb³⁺:(YGD₂)Sc₂(GaAl₂)O₁₂ 発振スペクトル

(2) ①熱レンズ効果、及び非線形カーレンズ効果を考慮した共振器条件計算コード開発、作製した計算コードより、熱レンズを考慮した任意の共振器構成における、共振器状態、カーレンズ効果の大きさを計算できるようになった。計算結果の一例を示すと図 6 に示されるような共振器構成で、図 7 に示されるような共振器内ビーム径が得られる事が確認された。これらの計算は高出力化に伴うビーム径の拡大、励起光とのモードマッチングの最適化、カーレンズ効果を見積もるうえで非常に重要である。

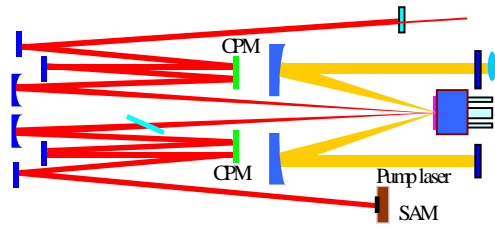


図 6. 高出力モード同期共振器概略図。

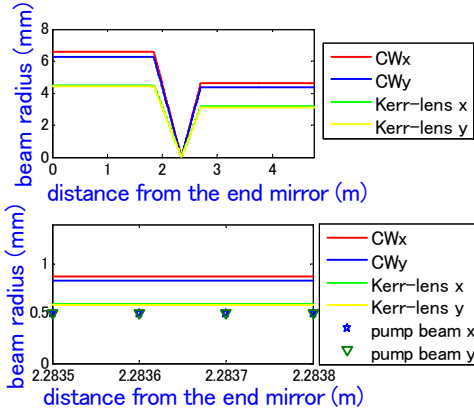


図 7. 共振器内励起光ビーム径、レーザー光ビーム径(CW)、レーザー項ビーム径(パルス)の比較

②超短パルスレーザー動作の定量的な計算コード開発。図 8 に計算された、共振器周囲に置けるスペクトルの変化を示す。分散量が -1300 fs² の時は安定な超短パルス発振を示すが、分散量を -1200 fs² に変化させると不安定になり超短パルス発振が得られない事がわかる。利得幅を固定した時の、変調深さと、限界短パルス幅の関係を図 9 (a)、変調深さを固定した時に、分散量とパルス幅の関係を図 9(b)に示す。図 9(b)には参考の為に単純なソリトン条件から得られるパルス幅も示してあり、両者で多少の違いは有るが近い値が得られている事がわかる。この計算では SSF では共振器内の分散補償が完璧ではない位置でのパルス幅を計算しているため、パルス幅がソリトンでの計算結果よりも幾分長めに出ているが、分散補償後を考えるとカーレンズモード同期では利得損失変調による時間空間中でのパルス成型効果が大きい為、ソリトン条件よりも短いパルスなることも計算された。また薄型ディスクレーザーにおい

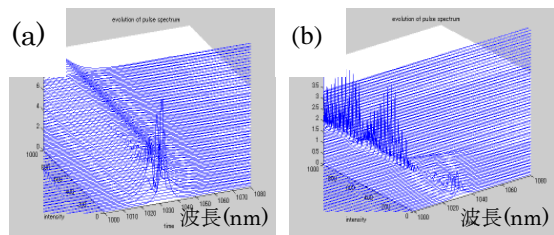


図 8. 共振器周囲におけるスペクトル変化。奥行き方向の軸が共振器周回数を示す。

- (a) 変調深さ 0.1、分散量 -1300 fs²、利得幅 16 nm
- (b) 変調深さ 0.1、分散量 -1200 fs²、利得幅 16 nm

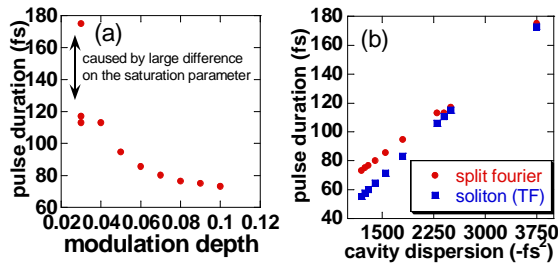


図9. (a)共振器内変調深さと限界パルス.
(b) 共振器内分散量とパルス幅の関係幅

ては自己位相変調効果が弱まる為に安定な短パルス発生が難しくなる可能性が考えられたが、計算上は変調深さを十分にとれば100 fs程度の短パルス発振が可能と考えられる事がわかった。

(3) 熱効果と非線形レンズ効果の影響を抑制する為の新規レーザーシステム(薄型ディスクレーザー)開発。 励起光源に140 Wのファイバー結合LDを使用し、直線型共振器を用いて、スロップ効率70%、出力70 Wを得ることに成功した(図10)。測定されたビーム品質 M^2 の値は33であった。連続発振ではあるが熱的影響を抑制し、Yb:Y₂O₃セラミックを用いた高出力動作に始めて成功した。この出力は前述の共振器シミュレーションにおいて十分な非線形効果を誘起するのに十分な値となる。現在共振器をモード同期用に改良し、半導体可飽和吸収体、分散補償素子、横モード制御を加えた共振器構成でレーザー実験を行っている(前項図6)。

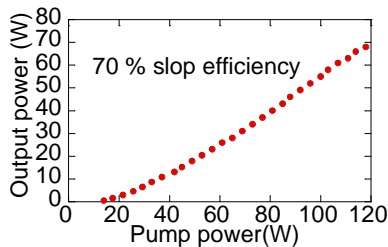


図10. 薄型ディスクレーザー出力特性

(4) 上記以外に並行して行った研究。 フォトニック結晶ミラーを用いたマイクロチップ径偏光レーザーを開発した。開発されたレーザーは非常に小型でシンプルな構成であり、パルス発振にも成功した。また共振器内に球面収差を大きく有するレンズを利用した実験ではラゲールガウシアンモードレーザー発振にも成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計22件)

[1] M. P. Thirugnanasambandam, Y. Senatsky, and Ken-ichi Ueda "Generation of radially and azimuthally polarized beams in Yb:YAG laser with intra-cavity lens and birefringent crystal."

Opt. Express **19** 1905-1914 (2011) 査読有

[2] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, R. Peters, S. T. Fredrich-Thornton, K. Petermann, and G. Huber, "Ultrashort pulse generation from diode pumped mode-locked Yb³⁺:sesquioxide single crystal lasers," Opt. Express **19**, 2904-2909 (2011) 査読有

[3] M. Tokurakawa, H. Kurokawa, Ae. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, "Continuous-wave and mode-locked lasers on the base of partially disordered crystalline Yb³⁺:{YGd₂}[Sc₂](Al₂Ga)O₁₂ ceramics," Opt. Express **18**, 4390-4395 (2010) 査読有

[4] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, M. Noriyuki, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, "Diode-pumped ultrashort-pulse generation based on Yb³⁺:Sc₂O₃ and Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic multi-gain-media oscillator," Opt. Express **17**, 3353-3361 (2009) 査読有

[5] 植田 憲一「セラミックレーザー」OplusE **33** 1262-1269 (2009) 査読有

[6] J. Li, K. Ueda, L. Zhong, M. Musha, A. Shirakawa, and T. Sato, "Efficient excitations of radially and azimuthally polarized Nd³⁺:YAG ceramic microchip laser by use of subwavelength multilayer concentric gratings composed of Nb₂O₅/SiO₂," Opt. Express **16** 10841-10848 (2008) 査読有

[7] J. Li, K. Ueda, M. Musha, L. Zhong, and A. Shirakawa, "Radially polarized and pulsed output from passively Q-switched Nd:YAG ceramic microchip laser," Opt. Lett. **33** 2688-2670 (2008)

[8] 植田 憲一, 「発展する高出力セラミックレーザー」応用物理 **77** 111-122 (2008) 査読有

[9] J. Dong, K. Ueda, and A. A. Kaminskii, "Continuous-wave and Q-switched microchip laser performance of Yb:Y₃Sc₂Al₃O₁₂ crystals," Opt. Express **16**, 5241-5251 (2008) 査読有

[10] A. A. Kaminskii, H. Rhee, H. J. Eichler, K. Ueda, T. Takaichi, A. Shirakawa, M. Tokurakawa, J. Dong, H. Yagi, and T. Yanagitani, "Mechanical and optical properties of Lu₂O₃ host-ceramics for Ln³⁺ lasants," Laser Phys. Lett. **5** 300-303 (2008) 査読有

・他12件

〔学会発表〕(計27件)

[1] K. Ueda, "Critical issues on ultra-high intensity solid state lasers, "Route toward Reality", JSPS Asian CORE Workshop on Next Generation Ultra-Short Pulse Lasers for High Field and Ultrafast Science, (invited) Mar.3, 2011, Wako-RIKEN, Japan

[2] K. Ueda, "Toward ultra intensity lasers," 6th Laser Ceramic Symposium, Dec.6-8, 2010. Münster, Germany

- [3] K. Ueda, “High power ceramic lasers, last 10 years,” Association of Asia and Pacific Physics Societies, Nov. 2010, Japan
- [4] 植田 憲一 「ファイバーレーザーとセラミックレーザーの現状と展望」、強光子場科学研究懇談会、Apr. 2010. 東京大学
- [5] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, and K. Ueda, “Estimation of Gain Bandwidth Limitation of Short Pulse Duration Based on Competition of Gain Saturation,” in ASSP 2010, paper AMB16. February 3, 2010, San Diego, USA
- [6] 戸倉川 正樹, 白川 晃, 植田 憲一、「LD 直接励起フェムト秒 Yb 添加セラミックレーザー」、超高速光エレクトロニクス研究会 2009 年 11 月 10 日筑波 招待講演
- [7] A. Shirakawa, H. Kurokawa, M. Tokurakawa, K. Ueda, N. Tanaka, Y. Kintaka, S. Kuretake, K. Kageyama, “Broadband-gain Nd³⁺-doped Ba(Zr,Mg,Ta)O₃ ceramic lasers,” 5th Laser Ceramic Symposium 2009 (invited) Dec. 10, 2009 Bilbao, Spain
- [8] K. Ueda, “Physics on High Intensity Lasers,” Asian Summer School on Laser Plasma Acceleration and Application (invited) Aug. 17, 2009, Hsinchu, Taiwan
- [9] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, R. Peters, S. Fredrich-Thornton, K. Petermann, G. Huber, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, “Femtosecond Diode-Pumped Yb-Doped Crystal and Ceramic Lasers with High Average Power,” Inter national laser physics workshop, 2009 Spain Barcelona, invited talk
- [10] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminiskii, “Continuous-Wave and Mode-Locked Laser Operations Based on Yb³⁺:(YGD₂)Sc₂(GaAl₂)O₁₂ Disordered Ceramic,” in CLEO2009, paper CFO3. May 31, 2009, Baltimore, USA
- [11] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, R. Peters, S. Fredrich-Thornton, K. Petermann, G. Huber, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, “Ultra-Short Pulses from Diode-Pumped Yb³⁺-Doped Crystal and Ceramic Lasers with High Average Power,” ASSP 2009, paper MC3 February 1, 2009, Colorado, U.S.A.
- [12] K. Ueda, “New era of high power solid state lasers, Ceramic Laser, Fiber Laser and Fiber Link of Frequency Standard in ILS/UEC,” ODG Spring Seminar (invited) Apr. 3, 2009, Chofu, Japan
- [13] 植田 憲一、「加速器・産業応用のための高平均出力高効率レーザー開発の進展」、KEK レーザー科学推進室報告会、2009 年 2 月 4 日、KEK 大ホール
- [14] 植田 憲一、「高出力ファイバーレーザー、セラミックレーザーの研究」、光科学拠点東西合同シンポジウム、2009 年 1 月 23

日東京大学

- [15] K. Ueda “Background of Ceramic Laser Research Works for Industrial and Scientific Applications (invited),” 4th LCS 2008, Nov.11, 2008 Shanghai, China
- [16] K. Ueda “Ceramic laser development in ILS/UEC (invited),” ASILS, Nov. 3, 2008 Gwangju, Korea
- [17] K. Ueda “Recent progress of ceramic lasers for ultrashort pulse generation (invited),” ICUIL, Oct. 31, 2008 Tongli, China
- [18] J.-F. Bisson, A. Shirakawa, K. Ueda, Yu. Senatsky, “Circular modes selection in Yb:YAG laser using an intracavity lens with spherical aberration,” Laser Optics 2008, June 24, 2008, St. Petersburg, Russia
- [19] J. Dong, K. Ueda, H. Yagi, “Concentration-Dependent Laser Performance of Yb:YAG Ceramics,” CLEO 2008, May 8, 2008, San Jose, CA, US
- [20] M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii, “Diode-pumped sub 60-fs Kerr-Lens mode-locked Yb-doped sesquioxide combined ceramic laser,” CLEO2008, CFP6, Oral May 4, 2008 San Jose, USA
- ・他 7 件

〔図書〕 (計 2 件)

- [1] 植田憲一、現代物理学の世界 高強度レーザー物理学、監修 二宮正夫編、講談社サイエンティフィック、pp. 67-79, 2010
- [2] 植田憲一、光科学の最前線 2 (「光科学の最前線」編集委員会編) 2009、pp. 40-41

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植田 憲一 (UEDA KENICHI)
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授
研究者番号：10103938

(2) 研究分担者

白川 晃 (SHIRAKAWA AKIRA)
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授
研究者番号：00313429