

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390123

研究課題名(和文) 高密度励起による高利得化及び高非線形材料を用いた超短パルスレーザーの研究

研究課題名(英文) Ultrashort-pulse generation directly from laser-diode-pumped mode-locked laser with high-gain and highly-nonlinear media.

研究代表者

川戸 栄 (KAWATO, Sakae)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60313730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：幅広い分野で応用が期待されている超短パルスレーザーであるが、効率が低く、大型・複雑・高価という問題がある。そこで、小型化かつ単純化、低価格化が容易な半導体レーザーを励起光源とする超短パルスレーザーの高効率・高出力・広帯域化・短パルス化を行うための要素技術を構築した。

まず、高密度励起を用いた高利得化により、半導体レーザーを励起光源に用いても、量子限界に近い効率を実現できることを明らかにした。さらに、高利得化および高非線形性を用いた超短パルスレーザーの理論を構築することにより、利得帯域を凌駕する発振スペクトルおよび超短パルス出力を、高効率かつ高出力に実現できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We study high-efficiency ultrashort pulse generation from mode-locked laser with intra-cavity highly nonlinear media. Spectral broadening inside mode-locked laser by using intra-cavity highly nonlinear media is advantageous to obtain ultrashort pulses and broad output spectra because nonlinear effects are easily enhanced by resonance inside the cavity.

For the analysis, we used two theories; i.e. a laser efficiency theory in which high gain medium by high intensity pumping which causes high-thermo-optic effects and a nonlinear Schroedinger equation in which a gain medium, a fast saturable absorber for mode-locking, an output coupler as a cavity loss, the second, third and fourth order dispersion are included. On the nonlinear effect, self-phase modulation in the gain and nonlinear media are only included. From the analysis, high-efficiency ultrashort pulse generation in which the output spectra and pulse exceeding the gain spectra.

研究分野：光量子エレクトロニクス

 キーワード：超短パルスレーザー モード同期 半導体レーザー励起 固体レーザー イッテルビウム 高密度励起
高利得 高非線形

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒域以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザーは、パルス幅が狭く、出力が高く、発振・可変スペクトルが広いこと、レーザー光化学をはじめ、原子内電子の挙動の超高速計測及び制御、光周波数コムによる超精密分光、超微細ナノ・マイクロ加工や機能性薄膜の創製、非線形顕微鏡や医療用レーザードリル・メスなど、幅広い分野での応用が期待されている。その実用化には、装置の小型化と高効率化及び高出力化、高繰り返しパルス動作、発振・可変スペクトルの広帯域化が課題とされている。これに対し、従来の超短パルスレーザーは、これらの特性の向上を図るほどに、出力が不安定になり、効率が下がるため、励起用の大型レーザー、増幅器、スペクトル拡大及びパルス圧縮器を必要とし、複雑かつ大型であった。これは、超短パルスレーザーの高効率化及び高出力化理論が存在しないこと、元となる連続波レーザーの出力及び効率が低いこと、発振・可変スペクトルの狭帯域化による超短パルス化の限界があることに起因する。

これに対して、半導体レーザー励起であり、レーザーフォトンと励起フォトンのエネルギーの比(量子効率)が90%を超え、約1 msと長蛍光寿命であり、利得スペクトルが約10 nm以上と広いことから、小型化、単純化、高効率化、高出力化、広帯域化、超短パルス化が容易であるため、イッテルビウムレーザーが注目され、様々な研究開発が進んでいる。しかし、イッテルビウムレーザーは、従来、極低温(10~100 K)でしか量子限界に近い高効率化(78%)が達成できず、室温における高効率化が課題であった。これは、室温ではイッテルビウムのレーザー下準位に分布するイオン濃度が高く、レーザー発振に必要な反転分布の形成が難しく、準4準位レーザー損失が生じるために効率が低下するためである。

そこで、申請者らは、高密度励起を用いた

レーザー媒質の高利得化によって準4準位レーザー損失を克服し、室温におけるレーザーの高効率化理論を構築し、世界最高かつ原理的な効率の限界である量子効率(~90%)に近い効率85%の連続波レーザーを開発した。

また、申請者らは、同じく高密度励起を用いたレーザー媒質の高利得化によって、パルス幅15 ns、ピーク出力490 W、周波数100 kHzの高繰り返しパルスレーザーを開発し、ナノ秒パルスレーザーとして世界最高の効率73%を達成し、パルス幅15 ps、ピーク出力270 kWのピコ秒パルスレーザーを開発し、ピコ秒パルスレーザーとして世界最高の効率35%を実現した、さらに高ピーク出力の100 MWのピコ秒パルスレーザーにおいても、効率9%を得ている。

また、広帯域化及び超短パルス化に関しては、レーザー内部に高非線形材料を挿入し、非線形効果を用いてゲインナローイングを克服することにより、従来のスペクトルフィルターなどによるパルス整形では実現が不可能であった、利得スペクトルの2倍の発振スペクトル及び利得スペクトルのフーリエ限界の半分の超短パルス発振を実現している。

2. 研究の目的

本研究では、超短パルスレーザー内部の非線形波動伝搬理論を構築し、小型化・単純化可能な高効率連続波レーザーを開発し、それを用いた高繰り返し・高効率パルスレーザーの高出力化を図り、超短パルスレーザーの高効率化、高出力化、広帯域化及び短パルス化を目指す。これらの要素技術研究によって、小型化及び単純化が可能となる超短パルスレーザー開発手法を確立する。

3. 研究の方法

1) 小型化、単純化可能な連続波レーザーの高出力・高効率化理論の構築

小型化、単純化が容易な半導体レーザーを励起光源とする連続波レーザーについて、高密度励起による高利得化を用いた高出力・高効率化理論を構築する。

2) 小型化, 単純化可能な連続波レーザーの高効率化の実証

上記理論を元に半導体レーザー励起連続波レーザーを開発し, 高効率化を実証する。これにより, 超短パルスレーザーの元となる連続波レーザーの高効率化及び高出力化のための要素技術が確立できる。

3) 超短パルスレーザーの高出力・高効率・広帯域・短パルス化理論の構築および諸特性の実現

超短パルスレーザーに関して, 高利得と高非線形性を用いたレーザーの高効率化, 高出力化, 広帯域化及び超短パルス化理論を構築する。広帯域化(利得スペクトルの2倍以上)及び短パルス化(利得スペクトルのフーリエ限界の半分以下)を実現する。これにより, 高効率化, 高出力化, 広帯域化及び短パルス化の要素技術を確立する。

4. 研究成果

1) 小型化, 単純化可能な連続波レーザーの高出力・高効率化理論の構築

まず, 連続波レーザーの高出力化に伴う熱光学歪補償技術を確立するため, レーザー発振時の熱光学歪の測定技術を開発した。また, 高出力化に伴うスロープ効率の低下を抑制するため, 高密度励起による結合効率の向上, 熱光学歪の最適補償によるモードマッチング効率の向上などの手法を開発した。発振閾値の低減に関しては, 励起光のモード体積の低減, 熱複屈折損失の補償, 冷却効率の向上による準4準位レーザー損失の低減手法を開発した。

特に, 励起光の非点収差に伴う熱光学歪およびレーザー共振器の非点収差を積極的に活用することにより, ビーム品質の低い半導体レーザーを励起光源として用いた場合も, ビーム品質の高い励起光源を用いた場合と同様の高効率化が実現できることを見出した。

2) 小型化, 単純化可能な連続波レーザーの高効率化及び高出力化

上記の理論を元に半導体レーザー励起連

続波レーザーを開発し, 実験結果を理論と設計に相互に反映させることにより, 最高効率77%の出力特性を実現した。これらの成果により, 高出力化によるスロープ効率の低下, 発振閾値の上昇の抑制するための基本的な理論の構築およびこれによる高効率化の実現に成功した。

3) 超短パルスレーザーの高出力・高効率・広帯域・短パルス化理論の構築および諸特性の実現

上記の結果を元にして, 理論を元にして, 高利得化及び高非線形性を超短パルスレーザーの高出力・高効率・広帯域・短パルス化理論を構築した。時間及び空間併せて4次元の波動伝搬を, 時間及び空間併せて4次元の波動伝搬を, レーザー内部の空間モード制限により時間+空間1次元(縦モード)と空間2次元(横モード)に分離し, 高非線形性に伴う光学歪を補償し, 高出力化, 高効率化, 広帯域化及び短パルス化する理論を構築した。

上記の理論を元に, 集光強度, 高速化飽和吸収体の飽和強度及び可飽和損失を変化させて, これに対するパルス及びスペクトル出力の変化を調べた。非線形効果を強めるに従い, 出力スペクトルが拡大し利得スペクトル幅の倍を超えることが確認できた。出力パルス幅も狭くなる傾向はこれまでの実験とも定性的に一致しているが, 出力スペクトルのフーリエ限界パルスよりもかなり広い点が異なる。特に, 非線形効果が強いとき, 2次元までの分散の最適化では, 出力パルス幅が出力スペクトルのフーリエ限界パルス幅の倍以上のオーダーで拡大してしまうという結果が得られた。これに対して, 共振器内部で4次元までを含む高次分散の最適化を行うことにより, 出力スペクトルのフーリエ限界パルス幅の約1.1倍にまで出力パルス幅を近づけることができた。結果として, 利得スペクトルのフーリエ限界パルスの半分のパルス幅を得ることができ, 実験とも定量的に一致す

ることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[学術論文] (計 6 件)

1. T. Yoshida, H. Okunishi, K. Kyomoto, K. Kato, K. Shimabayashi, S. Inayoshi, M. Morioka, and S. Kawato, “Theoretical Analysis of Dependence of Nonlinear Effects in Mode-Locked Yb:YAG Lasers with a Highly Nonlinear Intra-Cavity Medium,” applied sciences, Vol. 5, Issue 4, pp. 1431-1439 (2015), 査読あり
2. Y. Nomura, M. Nishio, S. Kawato, and T. Fuji “Development of ultrafast laser oscillators based on thulium-doped ZBLAN fibers”, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 21, No. 1, pp. 0900107 (2014), 査読あり
3. S. Matsubara, M. Tanaka, M. Takama, H. Hitotsuya, T. Kobayashi, and S. Kawato, “Picosecond thin-rod Yb:YAG regenerative laser amplifier with high average-power of 20 W”, Laser Physics Letters 10 055810-1-4, (2013), 査読あり
4. H. Hitotsuya, M. Takama, M. Inoue, S. Matsubara, Y. Sasatani, N. Shimojo, and S. Kawato, “Single-emitter laser-diode-pumped cavity-dumped ytterbium-doped $Y_3Al_5O_{12}$ laser,” International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol. 2, Issue 1, pp. 442-446 (2013), 査読あり
5. H. Hitotsuya, M. Takama, M. Inoue, S. Matsubara, Y. Sasatani, N. Shimojo, and S. Kawato, “Cavity-dumped mode-locked ytterbium-doped $Y_3Al_5O_{12}$ laser,” International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol. 2, Issue 1, pp. 434-436 (2013), 査読あり
6. H. Hitotsuya, N. Shimojo, S. Matsubara, M. Inoue, and S. Kawato, “High efficiency laser-diode-pumped cavity-dumped ytterbium-doped $Y_3Al_5O_{12}$ laser,” International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol. 2, Issue 1, pp. 450-453 (2013), 査読あり

[国際会議論文・発表] (計 14 件)

1. S. Kawato, “Efficiency improvement of ultra-short pulse lasers”, EMN Ultrafast Meeting 2016, Melbourne, Australia (2016), 招待講演 (予定)
2. S. Kawato, S. Inayoshi, A. Maruko, T. Yoshida, K. Kyomoto, K. Kato, H. Okunishi, K. Shimabayashi, M. Morioka, H. Kadoya, K. Hayashi, T. Sato, and S. Takashima, “Ultrashort pulse and broadband spectrum generation from mode-locked laser within highly nonlinear medium”, EMN Ultrafast

Meeting 2015, Las Vegas, USA (2015), 招待講演

3. S. Inayoshi, A. Maruko, T. Yoshida, K. Kyomoto, K. Kato, H. Okunishi, K. Shimabayashi, M. Morioka, H. Kadoya, K. Hayashi, T. Sato, S. Takashima, and S. Kawato, “Higher order dispersion effects for ultrashort pulse generation directly from a mode-locked laser with an intra-cavity highly nonlinear medium,” Frontiers in Optics 2015, San Jose, USA (2015), 査読あり
4. K. Kato, M. Nishio, H. Okunishi, A. Maruko, K. Kyomoto, T. Yoshida, S. Inayoshi, M. Morioka, S. Yamagata, and K. Shimabayashi, D. Mizuno, and S. Kawato, “Influences of high intensity pumping for laser threshold intensity”, Advanced Solid-State Lasers, Shanghai, China (2014), 査読あり
5. T. Yoshida, A. Maruko, K. Kyomoto, M. Nishio, K. Kato, H. Okunishi, K. Shimabayashi, M. Morioka, S. Inayoshi, S. Yamagata, and S. Kawato, “Theoretical analysis for ultrashort pulse mode-locked Yb:YAG lasers with an intra-cavity highly nonlinear medium”, Advanced Solid-State Lasers, Shanghai, China (2014), 査読あり
6. Y. Nomura, M. Nishio, S. Kawato, and T. Fuji, “Mode-Locked Thulium-Doped ZBLAN Fiber Laser Oscillators at 2 μ m”, Advanced Solid-State Lasers, Shanghai, China (2014), 査読あり
7. Y. Nomura, M. Nishio, S. Kawato, and T. Fuji, “Ultrafast 2 μ m Laser Oscillators Based on Thulium-Doped ZBLAN Fibers”, International Conference on Ultrafast Phenomena (2014), 査読あり
8. Y. Nomura, M. Nishio, S. Kawato, and T. Fuji, “Development of femtosecond thulium-doped ZBLAN fiber laser oscillators”, CLEO, San Jose, CA, USA (2014), 査読あり
9. M. Nishio, A. Maruko, N. Shimojo, H. Okunishi, K. Kato, K. Kyomoto, T. Yoshida, and S. Kawato, “High efficiency laser-diode-pumped continuous-wave Yb:YAG laser at room temperature”, CLEO, San Jose, CA, USA (2014), 査読あり
10. A. Maruko, M. Nishio, S. Matsubara, M. Tanaka, M. Takama, and S. Kawato, “Thin-rod Yb:YAG regenerative laser amplifier”, Pacific Rim Laser Damage 2014: Optical Materials for High-Power Lasers, Yokohama, Japan (2014), 査読あり
11. M. Nishio, A. Maruko, M. Inoue, M. Takama, S. Matsubara, H. Okunishi, K. Kato, K.

- Kyomoto, T. Yoshida, K. Shimabayashi, M. Morioka, S. Inayoshi, S. Yamagata, and S. Kawato, “High-efficiency cavity-dumped micro-chip Yb:YAG laser”, Pacific Rim Laser Damage 2014: Optical Materials for High-Power Lasers, Yokohama, Japan (2014), 査読あり
12. N. Shimojo, Y. Kondo, D. Kimura, M. Inoue, S. Matsubara, A. Maruko, D. Mizuno, M. Nishio, and S. Kawato, “Continuous-wave Yb3Al5O12 laser pumped by a single-mode laser-diode,” Advanced Solid-State Lasers, Paris, France (2013), 査読あり
 13. D. Kimura, S. Matsubara, K. Otani, T. Ueda, M. Inoue, N. Shimojo, Y. Sasatani, A. Maruko, D. Mizuno, M. Nishio, and S. Kawato, “Multimode Laser-Diode Pumped Continuous-Wave Stoichiometric Yb3Al5O12 Laser,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Munich, Germany (2013), 査読あり
 14. N. Shimojo, S. Matsubara, M. Inoue, D. Kimura, Y. Sasatani, A. Maruko, D. Mizuno, M. Nishio, and S. Kawato, “High efficiency Multi-mode laser-diode-pumped cavity-dumped Ytterbium-doped Yttrium Aluminium Garnet laser,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics, Munich, Germany (2013), 査読あり
- [国内研究会・シンポジウム発表] (計 21 件)
1. 稲吉真一, 吉田武志, 佐藤 徹, 奥西弘旭, 加唐賢人, 京元敬介, 嶋林恭輔, 森岡元希, 角谷宏樹, 林 啓佑, 川戸 栄, “共振器内に非線形媒質を挿入したモード同期レーザーの高速可飽和吸収体の影響に関する理論解析,” 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」(2016), 査読なし
 2. 森岡元希, 林 啓佑, 稲吉真一, 角谷宏樹, 佐藤 徹, 川戸 栄, “LD 励起 CW Ti:Sapphire レーザーの高効率化に関する理論的解析,” 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」(2016), 査読なし
 3. 佐藤 徹, 稲吉真一, 森岡元希, 林 啓佑, 角谷宏樹, 川戸 栄, 實野孝久, “レーザー利得媒質の熱光学歪と共振器の収差の計測及び補償に関する研究,” レーザー研シンポジウム 2015—平成 27 年度共同研究成果報告会—, 大阪大学 (2016), 査読なし
 4. 林 啓佑, 角谷宏樹, 森岡元希, 佐藤 徹, 稲吉真一, 川戸 栄, 實野孝久, “チタンサファイアレーザーの高効率化,” レーザー研シンポジウム 2015, 大阪大学 (2016), 査読なし
 5. 角谷宏樹, 林 啓佑, 森岡元希, 佐藤 徹, 稲吉真一, 川戸 栄, 實野孝久, “半導体レーザー励起連続波イッテルビウムレーザーの効率に対する励起光源のビーム品質の影響,” レーザー研シンポジウム 2016, 大阪大学 (2016), 査読なし
 6. 奥西弘旭, 加唐賢人, 西尾正敏, 京元敬介, 吉田武志, 嶋林恭輔, 丸小淳幸, 森岡元希, 稲吉真一, 山形沙由美, 水野大地, 川戸 栄, “LD 励起 Yb:YAG レーザーにおける高効率動作の理論的解析,” 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」(2015), 査読なし
 7. 吉田武志, 稲吉真一, 丸小淳幸, 西尾正敏, 奥西弘旭, 加唐賢人, 京元敬介, 嶋林恭輔, 森岡元希, 山形沙由美, 川戸 栄, “共振器内に非線形媒質を挿入したモード同期レーザーにおける高次分散及び集光強度の影響に関する理論的解析,” 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」(2015), 査読なし
 8. 稲吉真一, 西尾正敏, 丸小淳幸, 京元敬介, 奥西弘明, 加唐賢人, 吉田武志, 嶋林恭輔, 森岡元希, 山形沙由美, 川戸 栄, 實野孝久, “レーザーダイオード励起 V 型共振器 Yb:YAG レーザーの高効率化のための理論解析,” レーザー研シンポジウム 2015, 大阪大学 (2015), 査読なし
 9. 稲吉真一, 西尾正敏, 丸小淳幸, 京元敬介, 奥西弘明, 加唐賢人, 吉田武志, 嶋林恭輔, 森岡元希, 山形沙由美, 川戸 栄, 實野孝久, “半導体レーザー励起モード同期レーザーの非線形材料を用いた超短パルス化に関する研究,” レーザー研シンポジウム 2015, 大阪大学 (2015), 査読なし
 10. 森岡元希, 西尾正敏, 丸小淳幸, 京元敬介, 奥西弘明, 加唐賢人, 吉田武志, 嶋

- 林恭輔, 稲吉真一, 山形沙由美, 川戸 栄, 實野孝久, “レーザー利得媒質の熱光学歪と共振器の収差の計測及び補償に関する研究,” レーザー研シンポジウム 2015, 大阪大学 (2015), 査読なし
11. 森岡元希, 西尾正敏, 丸小淳幸, 京元敬介, 奥西弘明, 加唐賢人, 吉田武志, 嶋林恭輔, 稲吉真一, 山形沙由美, 川戸 栄, 實野孝久, “Ti:サファイアレーザーのGaN系レーザーダイオード励起によるCW発振,” レーザー研シンポジウム 2015, 大阪大学 (2015), 査読なし
12. 京元 敬介, 西尾 正敏, 丸小 淳幸, 奥西 弘明, 加唐 賢人, 吉田 武志, 松原 伸一, 川戸 栄, “Z型レーザー共振器における収差及び利得媒質の熱光学歪効果の影響に関する研究”, レーザー研シンポジウム 2014, 大阪大学 (2014), 査読なし
13. 加唐 賢人, 西尾 正敏, 丸小 淳幸, 奥西 弘明, 京元 敬介, 吉田 武志, 川戸 栄, 實野 孝久, “レーザー発振時における利得媒質の熱光学歪の測定法”, レーザー研シンポジウム 2014, 大阪大学 (2014), 査読なし
14. 吉田 武志, 西尾 正敏, 丸小 淳幸, 加唐 賢人, 京元 敬介, 川戸 栄, 實野 孝久, “共振器内部に非線形媒質を挿入したモード同期レーザーの超短パルス化”, レーザー研シンポジウム 2014, 大阪大学 (2014), 査読なし
15. 奥西 弘明, 西尾 正敏, 丸小 淳幸, 加唐 賢人, 京元 敬介, 吉田 武志, 川戸 栄, “V型レーザー共振器における収差及び利得媒質の熱光学歪効果の影響に関する研究”, レーザー研シンポジウム 2014, 大阪大学 (2014), 査読なし
16. 丸小 淳幸, 木村 大介, 下條 直哉, 西尾 正敏, 奥西 弘旭, 加唐 賢人, 京元 敬介, 吉田 武志, 嶋林 恭輔, 川戸 栄, “共振器内部に非線形媒質を挿入したモード同期レーザーの超短パルス化”, 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」, 福井大学(2014), 査読なし
17. 西尾 正敏, 下條 直哉, 丸小 淳幸, 木村 大介, 奥西 弘旭, 加唐 賢人, 京元 敬介, 吉田 武志, 嶋林 恭輔, 川戸 栄, “高密度LD励起Yb:YAGレーザーの高効率発振”, 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」, 福井大学(2014), 査読なし
18. N. Shimojo, M. Takama, M. Inoue, S. Matsubara, D. Kimura, A. Maruko, D. Mizuno, M. Nishio, S. Kawato, and T. Jitsuno, “High Efficiency Cavity-Dumped Mode-Locked Yb:YAG Laser,” レーザー研シンポジウム 2013, 大阪大学(2013), 査読なし
19. 下條直哉, 松原伸一, 木村大介, 丸小淳幸, 西尾正敏, 吉田武志, 奥西弘旭, 加唐賢人, 京元敬介, 川戸 栄, “高効率レーザーダイオード励起Yb:YAGキャビティダンプレーザーの研究,” Japan Photonics Network of Student 2013, 福井大学(2013), 査読なし
20. 木村大介, 松原伸一, 下條直哉, 丸小淳幸, 西尾正敏, 吉田武志, 奥西弘旭, 加唐賢人, 京元敬介, 川戸 栄, “ストイキオメトリックYb₃Al₅O₁₂レーザー,” Japan Photonics Network of Student 2013, 福井大学(2013), 査読なし
21. 下條直哉, 加唐賢人, 木村大介, 丸小淳幸, 西尾正敏, 奥西弘旭, 京元敬介, 吉田武志, 川戸 栄, “レーザーダイオード励起Yb:YAGレーザーの高効率化,” 電子情報通信学会技術研究報告「レーザー量子・エレクトロニクス」, 金沢大学(2013), 査読なし
- [その他] ホームページ
https://www.researchgate.net/profile/Sakae_Kawato
<https://u-fukui.academia.edu/SKawato>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
- 川戸 栄 (KAWATO, Sakae)
 福井大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 60313730