

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20346

研究課題名（和文）利得スイッチ半導体レーザーを用いた不可逆変化のシングルショット測定

研究課題名（英文）Single-shot measurement of irreversible changes using gain-switched semiconductor laser

研究代表者

小林 真隆（Kobayashi, Masataka）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：30911838

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究において、駆動エレクトロニクスを工夫することでパルス整形や繰り返し速度に柔軟な選択性を有する利得スイッチ半導体レーザーと、レーザー加工をはじめとする不可逆現象を観測可能なシングルショット分光手法とを組み合わせ、電気的な信号制御により幅広い時間スケールで発生する不可逆変化ダイナミクスを一つの分光システムで全て観測することが可能な「マルチタイムスケール・シングルショット分光システム」の根幹を担う、キャリア注入用のパルス電源装置と希土類添加ファイバー増幅（YDFA）を用いた利得スイッチ半導体レーザーのパルス増幅システムの構築を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

利得スイッチ半導体レーザーは、他の固体レーザーやファイバーレーザーなどに比べて、パルス整形や繰り返し速度の柔軟な選択性を有し、小型で安定、堅牢、高効率、加えて低価格であり環境耐性や長寿命を有するといった特徴を持つ。そのため工場や病院等の非グリーンな環境下で、超高速かつ不可逆測定が可能なレーザー分光装置の安定的な運用には、利得スイッチ半導体レーザーの活用が有効である。本研究は、その社会実装に向けた基礎的な原理の検証を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we were able to construct a pulse power supply device for carrier injection, which is the cornerstone of a "multitime-scale single-shot spectroscopic system" capable of observing all irreversible change dynamics occurring over a wide range of time scales in a single spectroscopic system by combining a gain-switched semiconductor laser with flexible selectivity in pulse shaping and repetition rate achieved by innovative drive electronics, and a single-shot spectroscopic method that can observe irreversible phenomena such as laser processing. We have also constructed a pulse amplification system for gain-switched semiconductor lasers using Yb-doped fiber amplification (YDFA).

研究分野：レーザー分光

キーワード：利得スイッチ 半導体レーザー シングルショット 不可逆現象 超高速分光

1. 研究開始当初の背景

1980年代後半から、固体レーザーのモード同期技術や高次高調波発生技術の進展に伴い、ピコ秒やフェムト秒、アト秒といった超短パルスレーザー技術が発展してきた。これにより、ポンプ・プローブ分光法に代表される超高速分光手法が開発され、物質の超高速なダイナミクスを実時間で観測できる手法として注目されている[1]。これらの時間領域では、光励起後に生じる励起状態の緩和過程や、テラヘルツ波の電場波形などを観測することが可能であり、それらを利用して様々な物質のダイナミクスが研究されてきた[2-3]。これらの超高速分光法では、ポンプ光で物質に光学的変調を与え、遅延時間の付いたプローブ光で時々刻々変化する様子を捉えることで検出を行うが、一連の情報を得るためには繰り返し測定を前提としている。そのためレーザー加工や光重合反応、光分解反応などの不可逆な過程を含むダイナミクスへの応用が困難であった。これらの不可逆現象は、サブピコ秒スケールの高速な電子遷移に始まり、そのエネルギーが電子間および電子格子間に受け渡されながら、ナノ秒やマイクロ秒の長い時間スケールで構造変化に至る[4]。研究代表者はこのような不可逆現象におけるダイナミクスの解明に高い関心を持っている。

これらの不可逆現象のダイナミクスの解明には、必要な情報をワンショットで取得可能な“シングルショット分光手法”が有用であると考えている。加えて、マルチ時間スケールで発生するダイナミクスを追跡するためには、半導体レーザーの活用が有効であると考えている。そこで、本研究では『利得スイッチ半導体レーザーを用いた不可逆変化のシングルショット測定』と題して、研究代表者がこれまで取り組んできたシングルショット分光手法と、利得スイッチ半導体レーザーとを組み合わせることで、レーザー加工をはじめとする不可逆現象の研究を行う。

2. 研究の目的

本研究の目的は、まずシングルショット分光手法と、利得スイッチ半導体レーザーとを組み合わせることで、プローブ光の時間窓を広範な時間スケールで1パルスごと任意に変調可能な「マルチタイムスケール・シングルショット分光システム」を開発することである。次に、開発した分光システムを用いて、レーザー加工の不可逆過程を観測し、超高速なキャリアダイナミクスと構造変化との因果関係を明らかにすることである。

光誘起不可逆現象の観測には、レーザー光の1パルスで物質のダイナミクスを捉える事が可能なシングルショット分光法が有効である[5-8]。しかし従来のシングルショット分光手法は、光源に固体レーザーやファイバーレーザーを用いており、プローブ光の時間窓を調整するためには、回折格子対やチャープミラーなどを用いた時間窓調整用の光学システムを、光源や測定システムとは別に用意する必要があった。またその時間窓も1パルス毎に変えられるものではなく、光学素子の配置をその都度調整する必要があった。そのため、それぞれの時間スケールで発生する不可逆なダイナミクスがどのような相関や因果関係を持っているか観測するには、一つのシングルショット分光システムで対応することは困難であった。

この課題を解決するために、素子単体で利得媒質と導波路および共振器を内在し、駆動エレクトロニクスを工夫することで、パルス整形や繰り返し速度に柔軟な選択性を有する利得スイッチ半導体レーザー[9,10]を、シングルショット分光法の光源として採用することに着眼した。これにより電氣的なトリガー信号を制御することで、幅広い時間スケールで発生する不可逆変化ダイナミクスを一つの分光システムで全て観測することが可能なシングルショット分光手法とする点が、本研究の最終的な目標である。

3. 研究の方法

本研究は、以下に示す4点の方法を主軸に研究を進める。

- (1) 東京大学物性研究所小林研究室の協力のもと、希土類添加ファイバー増幅(YDFA)を用いたInGaAs利得スイッチ半導体レーザーのパルス増幅システムを構築し、出力パルスのパワーの向上に取り組む。
- (2) 利得スイッチ半導体レーザーのキャリア注入用パルス電源装置の試作機を開発する。
- (3) シングルショット波形の取得用オシロスコープとのトリガー同期システムを構築し、分光システムとして完成させる。
- (4) SiやGaAsなどの半導体材料に対するレーザー加工でシングルショット過渡吸収測定を行い、光励起後のキャリア緩和から構造変化に至るまでの不可逆ダイナミクスの因果関係の解明に取り組む。

4 . 研究成果

以下に本研究で得られた成果を列挙する。

- (1) 希土類添加ファイバー増幅 (YDFA) を用いた利得スイッチ半導体レーザーのパルス増幅システムの構築に取り組んだ。結果として、100 ps 電気パルス励起により発振させた利得スイッチ半導体レーザーからのシード光パルス (繰り返し 100 MHz, ピークパワー74 mW, パルス幅 15 ps) を、希土類 (Yb) の添加量が異なる 2 つの YDFA に通し光増幅させることで、パルス幅およびパルス波形を維持したままピークパワー ~ 180 W (+33dB) まで増幅させることに成功した。
- (2) 利得スイッチ半導体レーザーのキャリア注入用パルス電源装置の試作機を開発および改良に取り組んだ。この試作機を用いて、上記のパルス増幅実験を行ったが、注入できる電気パルスのパルス幅が 100 ps に固定されているため、利得スイッチ半導体レーザーから出力される光パルスのパルス幅も固定されていた。そのため、キャリア注入用電源装置を設計し直し、電気パルスのパルス幅をピコ秒 ~ マイクロ秒スケールまで任意に変調可能にできるよう、パルス幅可変の駆動エレクトロニクスを作成と動作検証を行った。結果として電気パルスのパルス幅を最短で 200 ps から数十マイクロ秒以上まで任意に変調可能な電源装置を作成でき、電気パルス幅に応じて利得スイッチ半導体レーザーから出力される光パルス幅も変調できることを確認した。
- (3) キャリア注入用パルス電源装置を複数台作成し、それぞれに利得スイッチ半導体レーザーを駆動させ同期させることで、励起用パルス光とプローブ用パルス光としてそれぞれ機能できることを確認した。またこれらの波形信号をリアルタイムオシロスコープで検出可能であることも確認できた。

これらの成果から、本研究におけるシングルショット分光システムの根幹となる部分はほぼ完成したと言える。今後、このシングルショット分光システムを用いてレーザー加工などの不可逆現象の観測に取り組んでいきたい。

【参考文献】

- [1] 岩井伸一郎, 超高速分光と光誘起相転移(朝倉書店, 2014).
- [2] M. Maiuri *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **142**, 3 (2020).
- [3] M. Tonouchi, *Nat. Photon.* **1**, 97 (2007).
- [4] B. Rethfeld *et al.* *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 19 (2017).
- [5] Z. Jiang *et al.* *Opt. Lett.* **23**, 1114–1116 (1998).
- [6] J. Shan *et al.* *Opt. Lett.* **25**, 426 (2000).
- [7] G. P. Wakeham *et al.* *Opt. Lett.* **25**, 505–7 (2000).
- [8] Y. Minami *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **103**, 4–7 (2013).
- [9] T. Ito *et al.* *Communications Physics* **1**, 1 (2018).
- [10] T. Nakamura *et al.* *Opt. Lett.* **46**, 6, 1277–1280 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kobayashi Masataka, Arashida Yusuke, Asakawa Kanta, Kaneshima Keisuke, Kuwahara Masashi, Konishi Kuniaki, Yumoto Junji, Kuwata-Gonokami Makoto, Takeda Jun, Katayama Ikufumi	4. 巻 62
2. 論文標題 Pulse-to-pulse ultrafast dynamics of highly photoexcited Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 022001 ~ 022001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb476	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kumagai Ryo, Ono Ryohei, Sakimoto Shu, Suzuki Chiharu, Kanno Ken-ichiro, Aoyama Hiroshi, Usukura Junko, Kobayashi Masataka, Akiyama Hidefumi, Itabashi Hideyuki, Hiyama Miyabi	4. 巻 434
2. 論文標題 Photo-cleaving and photo-bleaching quantum yields of coumarin-caged luciferin	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry	6. 最初と最後の頁 114230 ~ 114230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochem.2022.114230	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤駿平、高宮健吾、小林真隆、八木修平、秋山英文、矢口裕之
2. 発表標題 ErドーパGaAsからの発光線の励起強度依存性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大澤敬太、小野稜平、野口良文、北田昇雄、森屋亮平、平野誉、牧昌次郎、秋山英文、小林真隆、板橋英之、樋山みやび
2. 発表標題 北米産ホタルルシフェラーゼ中のAkaLumine吸収測定
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林真隆、中村考宏、中前秀一、松井康浩、金昌秀、秋山英文
2. 発表標題 利得スイッチ 1270 nm DFB 半導体レーザーによる 5.3ps パルス発生
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢野裕子、高宮健吾、藤川沙千恵、八木修平、矢口裕之、小林真隆、秋山英文
2. 発表標題 窒素 ドープGaAs 中の等電子トラップに局在した励起子分子の束縛エネルギーに関する研究
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://aki.issp.u-tokyo.ac.jp/M_Kobayashi/index.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------