

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15463

研究課題名(和文) 中赤外テーパファイバーを用いたオールファイバースペクトルシステムの開発

研究課題名(英文) Development of All Fiber Gas Spectroscopy System Based on Mid-Infrared Tapered Fiber

研究代表者

金 磊 (Jin, Lei)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：10825748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、代表者の金磊がこれまで進めてきたファイバレーザ、光周波数コム、テーパファイバの研究を中赤外波長帯域へ展開し、それらをガス分光分析などの環境、医療用光センシングへ応用した。そして、光周波数コム用超短パルスシードレーザの開発に成功し、ガス分光のために新たなモード同期法も提案した。また、ガス分光用テーパファイバを用いたキャビティリングダウン分光法(CRDS)を実現し、安定化、小型化、低コスト化などにおいて改善を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種分子に対して顕著な振動吸収スペクトルが存在する中赤外波長領域は、科学研究にとって非常に重要な波長帯であり、世界中で活発に研究がなされている。官能基の特徴的な赤外吸収による化学物質の同定も、本赤外領域の関連技術が得意とするところである。本研究では、代表者が開発した中赤外光周波数コムを用いたテーパファイバキャビティリングダウン分光法(CRDS)を実証し、エバネッセント光の伝搬特性を探究した。このようなオールファイバースペクトルシステムを実現することで、研究機関の実験室などの環境に限定して用いられてきた高感度・高分解能な分光法の対象を、一般工場や病院等までにその応用先を広げることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this project, based on the representative researcher's works in the field of fiber lasers, optical frequency combs, and tapered fibers so far, the research will be expanded to the mid-infrared wavelength band, and applied to environmental and medical optical sensing such as gas spectroscopic analysis. The ultrashort pulse seed laser for optical frequency combs has been developed, and a new mode synchronization method for gas spectroscopy was proposed. In addition, a cavity ring-down spectroscopy (CRDS) using a tapered fiber for gas spectroscopy has been realized, which have made improvements in terms of stabilization, miniaturization, and cost reduction.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：オールファイバキャビティリングダウン 赤外光周波数コム テーパーファイバー ファイバレーザ ガス分光

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

様々な分子の顕著な振動吸収を示す波長が集中する赤外帯域は、科学研究にとって非常に重要な波長帯域である。特に安定したレーザー光源(光周波数コムなど)を利用して物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の成分、構造解析や定量を行うことができる。このような手法は、製造業、通信、医療、ヘルスケアなどに幅広く用いられている。

近年、微量原子/分子等を高感度分析法として、超高感度レーザー吸収分光法であるキャビティリングダウン分光法(CRDS)と目標原子/分子を含んだ試料の赤外帯域基本音吸収を組み合わせた分析法が提案され、開発が進められている。空間デバイスを用いて開発した分光用 CRDS では確立された技術を用いてオールファイバで実現できれば、より安定で小型低コストな特長を兼ね備えた新たな分光計測システムを構築することができる。

2. 研究の目的

本研究は、代表者の金磊がこれまで進めてきたファイバレーザ、光周波数コム、テーパファイバの研究を中赤外波長帯域へ展開し、それらをガス分光分析、二光子顕微鏡などの環境、医療用光センシングへの応用するものである。

普通のソリッドコアファイバはマイクロ光導波路の一種であり、光波がファイバコアを中心としてクラッドの範囲内に伝搬し、クラッド外の媒質に対して作用を及ぼすことはできない。一つの解決方法は、中赤外用ファイバにテーパ加工や D 形加工技術などを適用することで、光が伝搬させる同時に導波路の周りに強いエバネッセント光を生成させ、光伝搬の安定性と光と物質の相互作用の両方を実現することである。本研究では、これらのテーパファイバを利用し、安定化された高機能モード同期光ファイバレーザを実現し、微量ガス分光、二光子顕微鏡などの環境、医用応用を進める。

3. 研究の方法

(1) 非線形偏波回転による光周波数コム用超短パルスシードレーザ

希土類元素添加ファイバを用いたモード同期光ファイバレーザを利用し、フェムト秒/ピコ秒の超短パルスを生成させる。さらに、シード光源として電気回路を用いて光周波数コムを制御させる。

(2) テーパファイバの加工

普通の 1.5 μm 用シリカガラスファイバと 1.7~2.3 μm 用 Ge 添加石英コアファイバを原材料として、熱を加えながら引っ張って、更により小さいコア径を持つテーパファイバを製作する。そして、テーパ部分の周りに強いエバネッセント光を生成させ、ガスセンシングへ応用する。

(3) キャビティリングダウン (CRDS)への応用

近赤外と中赤外波長領域で様々なガスを検出するため、テーパファイバを用いてガス分光システムを構築する。

4. 研究成果

図 1 に示すような非線形偏波回転を用いた波長 1 μm 帯域モード同期 Yb 添加ファイバレーザをシード光源として構築した。そして、キャビティ分散調整し、ソリトンライク、ストレッチパルス、シミュラトンパルスを出力することができる。そのソリトンライクパルス

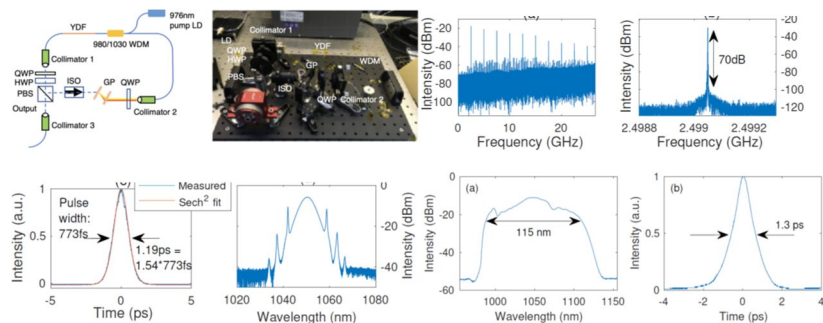


図 1 波長 1 μm 帯域のモード同期 Yb 添加ファイバレーザ

ソリトンライクパルスを手法を利用することで、高次繰り返し周波数を調整でき、世界最高ク

スの安定性がある(SNR > 70 dB)2.5 GHz の受動モード同期を実現した。また、光学バンド幅 115 nm のシミュラトンプルスの世界で初めて実現した。

さらに、新しい受動モード同期法として、図 2 に示すようなハイブリッドモード同期ファイバレーザを提案し、モード同期及びモード可変が可能であることを示している。研究代表者は本研究内容を題材として世界有数の国際会議 CLEO-PR2022 から招待講演を依頼された。また、中赤外分光のための光源として波長 2 μm 帯域の Tm 添加ファイバレーザを安定に動作させることを実現した。さらに、そのレーザのブラックソリトンセルフモード同期を世界初めて実現した(図 3)。

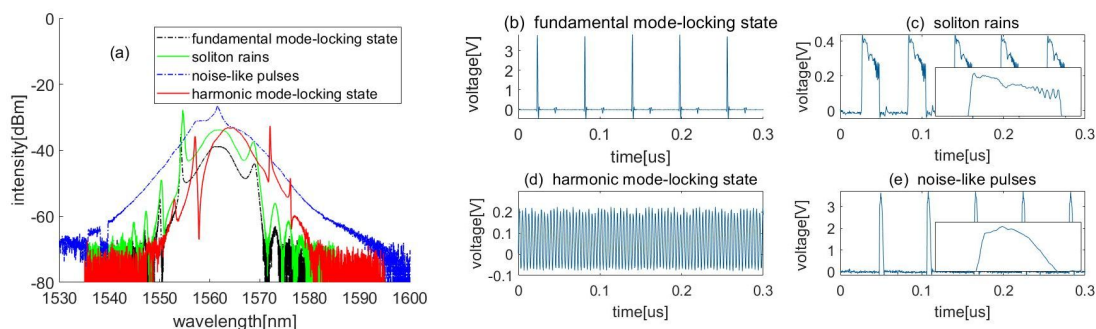


図 2 ハイブリッドモード同期モード可変ファイバレーザ

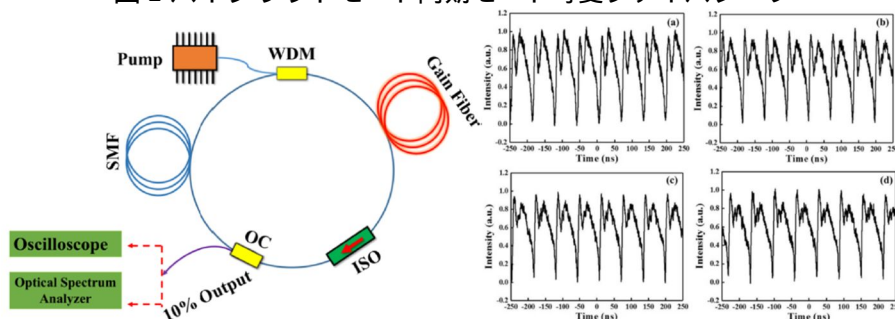


図 3 ブラックソリトンセルフモード同期 Tm 添加ファイバレーザ

一方、ガス分光用テーパファイバの加工法も確立した(図 4)。そして、作製したテーパファイバを利用し、オールファイバ CRDS キャビティを構築してガス分光の測定を実現(図 5)。また、2-3 μm の広帯域を有する光源を利用し、全偏波維持光ファイバにより CRDS 構成するキャビティをガス分光分析に応用する検討も進めた。

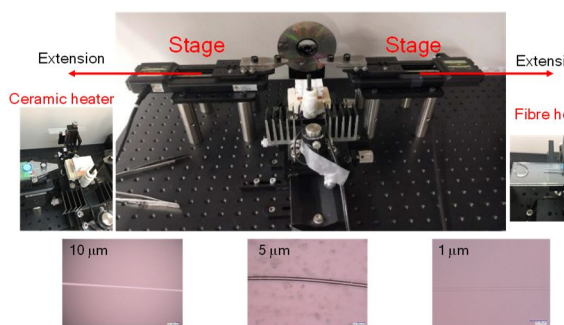


図 4 テーパーファイバの加工システム

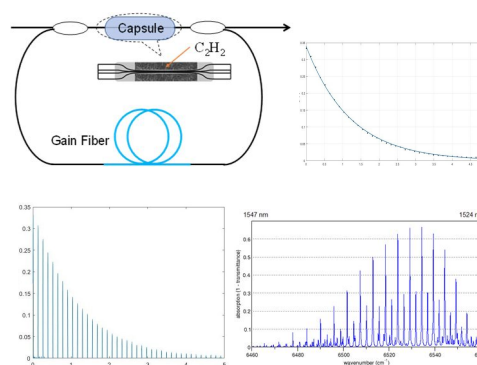


図 5 テーパーファイバ CRDS ガス分光

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hongbo Jiang, Yunpeng Huang, Zihao Zhao, Takuma Shirahata, Lei Jin, Shinji Yamashita, and Sze Y. Set	4. 巻 45
2. 論文標題 Laser mode locking using a single-mode-fiber coil with enhanced polarization-dependent loss	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2866-2869
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.393093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuanjun Zhu, Zekun Cui, Xiangnan Sun, Takuma Shirahata, Lei Jin, Shinji Yamashita, and Sze Yun Set	4. 巻 28
2. 論文標題 Yuanjun Zhu, Zekun Cui, Xiangnan Sun, Takuma Shirahata, Lei Jin, Shinji Yamashita, and Sze Yun Set	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27250-27257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.402173	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 Zhao Zihao, Jin Lei, Set Sze Yun, Yamashita Shinji	4. 巻 46
2. 論文標題 2.5 GHz harmonic mode locking from a femtosecond Yb-doped fiber laser with high fundamental repetition rate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3621 ~ 3621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.431735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhao Zihao, Jin Lei, Set Sze Yun, Yamashita Shinji	4. 巻 47
2. 論文標題 Broadband similariton generation in a mode-locked Yb-doped fiber laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2238 ~ 2238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.456808	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yang Song, Zhang Qian-Yun, Li Li, Jin Lei, Chen Shih-Chi	4. 巻 121
2. 論文標題 Generation of dark solitons in a self-mode-locked Tm-Ho doped fiber laser	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Infrared Physics & Technology	6. 最初と最後の頁 104043 ~ 104043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.infrared.2022.104043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Song, Zhang Qian-Yun, Zhu Zhi-Wei, Qi Yao-Yao, Yin Peng, Ge Yan-Qi, Li Li, Jin Lei, Zhang Ling, Zhang Han	4. 巻 152
2. 論文標題 Recent advances and challenges on dark solitons in fiber lasers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 108116 ~ 108116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2022.108116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhu Yuanjun, Xiang Fulin, Jin Lei, Set Sze Yun, Yamashita Shinji	4. 巻 11
2. 論文標題 All-Fiber Dual-Wavelength Mode-Locked Laser Using a Bend-Induced-Birefringence Lyot-Filter as Gain-Tilt Equalizer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JPHOT.2019.2946380	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Lei Jin, Fulin Xiang, Yohei Sugiura, Yuanjun Zhu, Aiqi Ding, Sze Yun Set, Shinji Yamashita
2. 発表標題 All-polarization-maintaining Erbium-doped mode-locked fibre laser using CNT-coated PANDA Microfibre
3. 学会等名 CLEO-PR (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wei Cai, Chih-Hsien Cheng, Guanyu Ye, Lei Jin, Li Li, Sze Yun Set, Shinji Yamashita
2. 発表標題 Mode-locking sate switchable Er-doped fiber laser based on a hybrid scheme of graphene oxide and nonlinear polarization rotation
3. 学会等名 CLEO-PR (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zihao Zhao, Guanyu Ye, Takuma Shirahata, Sean Wolfe, Lei Jin, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita
2. 発表標題 Reduction of Noise in a Passively Harmonic Mode-locked Fiber Laser by Optimizing Cavity Length
3. 学会等名 OPTICA CLEO 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Lei Jin, Li Li, Sze Yun Set, Shinji Yamashita
2. 発表標題 Microfiber sensors for monitoring ambient gas and fine particulate matters
3. 学会等名 SPIE Photonics Asia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zihao Zhao, Lei Jin, Sze Yun Set, Shinji Yamashita
2. 発表標題 2.17 GHz Soliton-like Harmonic Mode-locking Generated from an Yb-doped Fiber Laser with Anomalous Net Dispersion
3. 学会等名 OSA CLEO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiaqi Qu, Yuchen Tian, Lei Jin, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita
2. 発表標題 Fiber Loop Ring-Down with Tapered Fiber for Gas Sensing
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuchen Tian, Jiaqi Qu, Lei Jin, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita
2. 発表標題 Nano-Tapered Fiber Based Micro Loop Resonator
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoko Yokokawa
2. 発表標題 Ultra-broadband spectrum generation from a stretched-pulse mode-locked Yb-doped fiber laser at high repetition rate
3. 学会等名 CLEO Laser Science to Photonic Applications 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoko Yokokawa
2. 発表標題 Coherent light source with 106-nm broadband spectrum generated directly from Yb-doped fiber oscillator
3. 学会等名 SPIE Photonics West LASE (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lei Jin
2. 発表標題 Advanced Fiber Lasers for Intelligent Bio-Imaging, 3D Imaging, Environmental Sensing Applications
3. 学会等名 Advanced Fiber Laser (AFL) Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoko Yokokawa
2. 発表標題 Ultra-broadband Yb-doped fiber mode-locked laser and its applications in gas sensing and bioimaging
3. 学会等名 SPIE International Conference on Optical Instrument and Technology (OIT) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lei Jin
2. 発表標題 SPIE International Conference on Optical Instrument and Technology (OIT)
3. 学会等名 The 8th Applied Optics and Photonics China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lei Jin
2. 発表標題 Generation of Optical Pulses with 69-nm-Wide Broadband Spectrum Directly from a Mode-locked Yb-doped Fibre Laser
3. 学会等名 CLEO Europe (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lei Jin
2. 発表標題 The Impact of Saturable Absorber Recovery Time in Hybrid Mode-Locked Fiber Laser Design
3. 学会等名 CLEO: Science and Innovations (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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2件

国際研究集会 CLEO-Europe	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 CLEO: Science and Innovations	開催年 2019年～2019年

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			
米国	Rochester University			
中国	Harbin Engineering University			
中国	The Chinese University of Hong Kong			
米国	Rochester University			
フィンランド	Aalto University			