

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02156

研究課題名(和文)電気光学変調光周波数コムを用いたリアルタイム計測装置の開発

研究課題名(英文) Development of real-time measurement system using electro-optic-modulation frequency comb

研究代表者

西川 正 (NISHIKAWA, Tadashi)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20374069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,580,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーの専門家でなくても手軽に扱えロバストでフィールド環境でも利用可能な、1台のフリーランニング連続発振半導体レーザーと多段の電気光学変調器を用いた光ファイバー結合ベースのデュアルコムリアルタイム計測装置の研究開発を行った。高精度波長計、波長可変レーザー、ヘリオットセルと組み合わせる事で、1510-1585 nmの広い波長範囲に渡るデュアルコム分光計測が可能となり、アセチレン標準ガス吸収線スペクトル計測を9.3 msの計測時間に於いて350 MHzの絶対周波数精度で達成し、腎臓病のバイオマーカーであるアンモニアガススペクトル計測感度を300 ppmから10 ppmに迄向上させる事に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーの専門家でなくても手軽に扱え、ロバストでフィールド環境でも利用可能な、本デュアルコムリアルタイム計測装置の開発により、現在広く普及しているフーリエ変換赤外分光光度計では実現困難な広帯域高精度高速リアルタイム計測が可能となり、その性能を活かした、環境ガスリモートセンシング、燃焼過程モニタリング、生体反応計測、バイオマーカー計測による疾病診断、長距離超精密距離計測分野へ利用の道が拓けた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new dual-comb real-time measurement system that can be easily handled by non-laser experts. They are based on optical fiber coupling with a single free-running continuous-wave semiconductor laser and a multi-stage electro-optic modulator, which is robust and can be used in field environment. Combined with a high-precision wavelength meter, variable wavelength laser, and Herriott cell, dual-com spectroscopy measurement over a wide wavelength range of 1510 to 1585 nm is possible. Standard sample acetylene gas absorption line was measured in 9.3 ms measurement time with an absolute accuracy of 350 MHz. We also succeeded in improving the measurement sensitivity of ammonia gas spectrum, which is a biomarker for kidney disease, from 300 ppm to 10 ppm.

研究分野：光周波数コム

キーワード：デュアルコム分光 リアルタイム計測 光周波コム 電気光学変調光周波数コム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の分光法は、プリズムや回折格子等の分散型素子を利用して光スペクトルを空間上で分離して各波長の強度を順次計って行くというものであったが、分散素子の限界により高い波長分解能が得られず、波長毎に強度を計っていくので広いスペクトル帯域の計測には時間を要するという問題があった。この問題点を克服する為に、赤外スペクトルを測定するためのフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) が開発された。FTIR では光源から出射される赤外光をビームスプリッタ (BS) で 2 つの光路に分け、一方の光は移動鏡側に、もう一方の光は固定鏡側に進ませる。ここで移動鏡はレーザーの進行方向に一定速度で移動させる。移動鏡および固定鏡でそれぞれ反射した光は再び BS に戻り合成され、両方の光の光路差が時間に伴って変化することにより干渉する。この干渉波を単一の検出器で検出し、PC を用いてフーリエ変換することで赤外スペクトルを得る。分散型の分光器と比較して広帯域高分解能の計測が高速で可能となり、各メーカーから様々な計測装置が製品化され広く普及している。しかしながら、さらに波長分解能や計測時間の高速化を図るには、移動鏡の移動速度と移動距離が制限要因となっていた。

そこで、この制限を克服する為に、移動鏡の代わりに、繰返し周波数が f_{rep} と $f_{rep} + \Delta f_{rep}$ のように僅かに異なる 2 台のモードロックレーザーを用いたデュアルコム分光法がマックス・プランクの Hänsch 教授のグループにより考案された [Nature Photonics 4(1)55, 2010]。2 台のレーザーからの光は繰返し周波数と同じ間隔で等間隔に並んだ輝線スペクトルから成る光周波数コム光を形成する。両者の僅かな輝線スペクトル間隔の違い Δf_{rep} により、二つのコムを構成する各輝線スペクトルの光周波数差によって生じるビート周波数は、元の光周波数と線形関係になるので、回折格子等を用いずに光の周波数を RF 領域のビート信号に変換して計測する事が可能となる。本手法は、移動鏡が不要なので、FTIR よりさらに高分解能な分光をより高速に行う事が可能となる。しかしながら、2 台のレーザーの繰返し周波数と位相を複雑な制御機構を用いて高精度に同期する必要があるため、広い帯域に渡るスペクトルを一度に取得するためには低膨張ガラス光共振器に安定化した別の狭線幅レーザーを用いてコムを狭線幅化しなければならず、高度な技術を必要とする為に一部のレーザーの先端研究機関でのみで実施され、本分光法を世の中に広く普及させる為の壁となっていた。また、測定時間をさらに短くする為には、レーザーの高繰返し化が必要となるが、光共振器ベースのレーザーでは数 GHz 迄の高繰返し化が限界であった。

2. 研究の目的

本研究では、上記デュアルコム分光法の問題点を克服する為に、モードロックレーザーの代わりに、申請者が開発を行ってきた、フリーランニングの連続発振 (CW) 半導体レーザーを電気光学変調 (EOM) 器で変調して発生させた光周波数コム光源を用いた、新たなデュアルコム分光法を開拓することで、デュアルコム分光法の優れた特長である広帯域性、高分解能、高速性を兼ね備え、かつ従来法のようにレーザーの高度な位相同期を必要としないのでレーザーの専門家以外でも手軽に扱え、フィールド環境での利用も可能な、電子機器ベースのデュアル EOM コム計測装置の開発を行い、高分解能高速リアルタイム計測を実現し、環境ガスリモートセンシング、微量ガスのリアルタイム計測による半導体製造過程やエンジン燃焼過程のモニタリング、生体反応計測、長距離超精密距離計測等に適用出来るようにする。

3. 研究の方法

図 1 に我々が考案した電気光学変調器ベースのデュアルコム分光方式の構成図を示す。全てファイバー結合にて構成されており、大変口バスタなシステムとなっている。フリーランニングの連続発振半導体レーザー (CW Laser) からの光を二分枝し、片方の光周波数は音響光学変調器 (AOM) を通して f_{shift} だけシフトする。それぞれの出力は強度変調器 (IM) と多段の位相変調器 (PM) に通す。各一連の変調器は基準信号発生器からの周波数 f_{mod} 及び $f_{mod} + \Delta f$ の RF 正弦波にて駆動され、それらと同じ周波数のモ

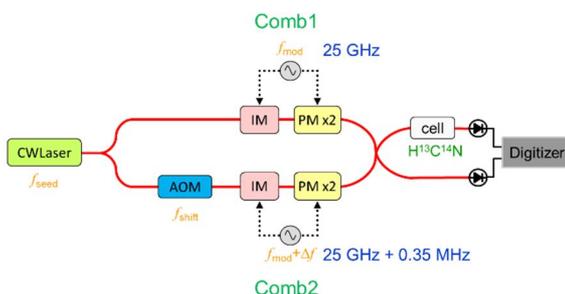


図 1. デュアル EOM コム分光方式の構成図

ード間隔を持つ光周波数コム光 Comb1 及び Comb2 を形成する。両方の光は 2 対 2 の光カプラーで混合され、片側の出力ではガスセルを通して吸収スペクトルの測定を行い、もう片側はレファレンス光として用いる。図 2 に本方式による光スペクトル計測の仕組みを示す。Comb1 と Comb2 のモード中心のシード光周波数は AOM で f_{shift} だけ差を付けているので、両者を混合した光を高速フォトディテクターで受けてビート信号を観測すると、光の吸収スペクトルと同じ強度形状を持つ周波数 f_{shift} を中心とし Δf 間隔の RF 領域のスペクトルが得られる。

従来のモードロックレーザーと比較して我々が考案した本方式の特徴を以下に示す。

複雑な制御機構不要：1台のCW半導体レーザーから分岐した光を元に二つのコム光源を生成するので、レーザー間の複雑な位相同期が不要となりレーザーの非専門家でも扱える。

短時間計測が可能：光共振器を用いない為に、25 GHz という高い繰返し周波数を実現出来、計測時間が短く原理的に高速計測が可能。またその分積算回数も増やせるので高いSN比が得られる。

コムの狭線幅化不要：一度に測定出来るスペクトル幅は(繰返し周波数)² ÷ (2 × コムの線幅)に等しいので、高い繰返し周波数が実現出来る本手法ではコムの狭線幅化が不要となり、市販の半導体レーザーが利用でき、低膨張ガラス光共振器を用いた高度な狭線幅化は不要となる。

高い1本あたりのコム強度：広モード間隔に伴いコムの本数が少ないので、コム1本あたりの強度が大きくなり高いSN比のスペクトルが得られ、高感度計測に有利になる。

測定スペクトル領域や波長分解能選択の柔軟性：シードレーザー波長の選択やコムのモード間隔 f_{mod} 及びその差 Δf を自在に変えられるので、計測目的に応じてスペクトル領域や帯域、波長分解能、応答時間、データ取得時間の条件を柔軟に設定する事が出来る。

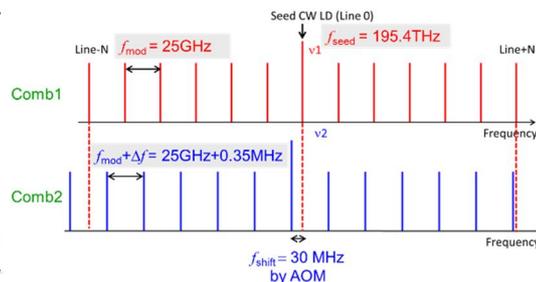


図2 . デュアル EOM コム分光の計測原理

4 . 研究成果

(1)自動補間法によるアセチレン吸収線スペクトル高速測定

EOM コムはモード間隔を任意に設定でき、モード間隔を広げることで帯域を広げることが可能だが、一方で分子分光を行うには分解能が足りなくなる。この解決策としてDFBレーザーの周波数をシフトさせながら取得したスペクトルを重ねてモード間隔を補間する方法を行ってきたが手間と時間を要していた。本研究ではDFBレーザー周波数とAOM駆動周波数とを同期してシフトさせながら計測する事で、モード間隔の補間を自動的に9.3 msで行うことに成功した。

図3に本研究の実験系を示す。シードレーザーとなるDFBレーザーを2分岐させ片方の周波数をAOMでシフトし、それぞれに変調をかけてEOMコムを生成する。モード間隔は25 GHz および25 GHz + 0.35 MHzである。生成した2つのEOMコムによりガスセル内に封入したC₂H₂のデュアルコム分光を行う。本研究では2チャンネル信号発生器を用いてDFBレーザーとAOMの周波数を同期してシフトさせた。ダウンコンバートしたマイクロ波信号の中心の輝線周波数はシードレーザー周波数とは関係せずにAOMの周波数で決まる。よってレーザー周波数とAOM周波数を同期してシフトしながら計測する事により、フーリエ変換して得られるマイクロ波信号が自動補間されたものになる。図4の赤線で本実験系で9.32 msのシングルショット計測で取得したアセチレン吸収線スペクトルを示す。緑線で示したHITRAN データベースの値と良く一致した結果を得る事が出来た。

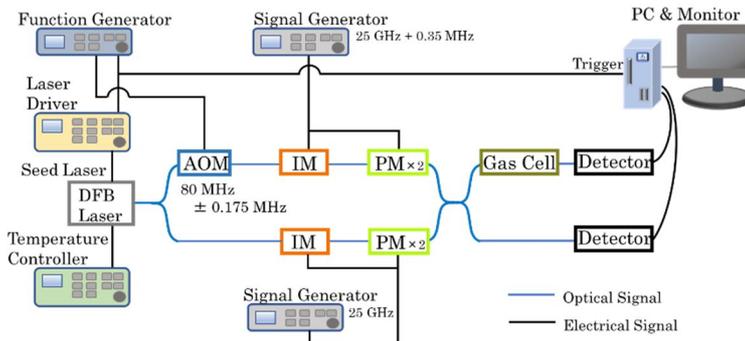


図3 . 自動補間実験系

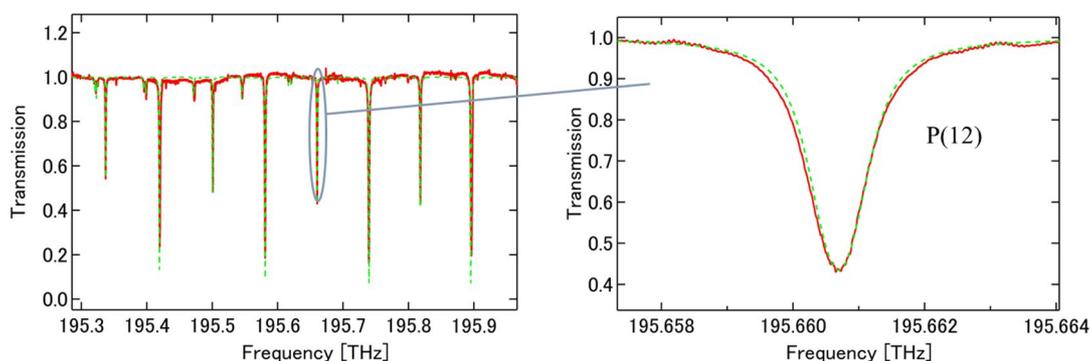


図4 . アセチレン吸収線スペクトル(光路長 5.5 cm、圧力 50 Torr)

(2)波長計を用いたPID制御による高精度計測

先の自動補間法では、DFB レーザーの周波数シフトをレーザードライバーの駆動電流変更によって行っている為に、レーザー周波数の絶対値が保証されず計測結果に誤差が生じてしまう。そこで、図5の実験系に示したように高精度波長計を用いてDFB レーザー波長を計測しながらその測定データを元にレーザー駆動電流をPID制御し正確に波長を定

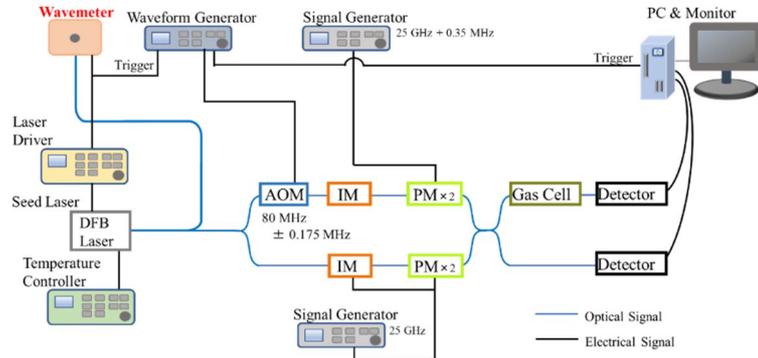


図5 . 波長計制御による自動補間実験系

めて自動補間する事で、測定波長の確度を高める試みを行った。図6に本手法で取得したアセチレン吸収線スペクトルの計測結果を、表1に測定した各吸収線の中心波長のHITRANデータベースからの誤差を示す。誤差の標準偏差は346 MHzであった。自動補間を行うのに波長計を用いてDFB レーザー波長を三角波状にシフトしているが、その追従性にまだ問題があり、PIDパラメーターのさらなる最適化が必要である。

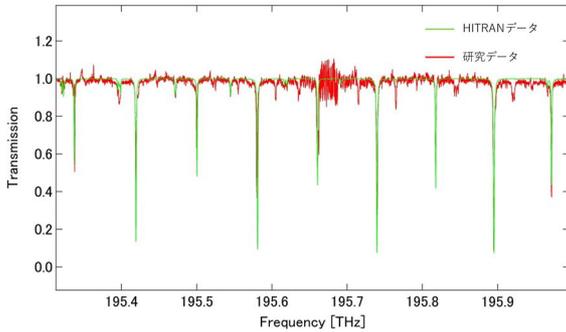


図6 . アセチレン吸収線スペクトル

本数	HITRAN [THz]	本研究 [THz]	差 [GHz]
1	195.337351	195.338072	0.721
2	195.419302	195.419359	0.057
3	195.500531	195.500271	-0.26
4	195.580995	195.580301	-0.694
5	195.660697	195.660761	0.064
6	195.739676	195.740003	0.327
7	195.817851	195.817922	0.071
8	195.895303	195.895237	-0.066
9	195.971991	195.971979	-0.012
10	196.047877	196.047811	-0.066
標準偏差			0.3457

表1 . HITRAN データベースとの比較

(3)波長可変半導体レーザーを用いた計測波長領域拡大

上記の測定はシードレーザーとしてDFB レーザーを用いたが、一つのDFB レーザーチップにおける波長可変範囲は6 nm程度と大変狭いので、測定したいガスの吸収線波長に応じてDFB レーザーを選んで測定する必要があった。この問題を解決する為に、1510-1630 nmの広い範囲をカバーできる波長可変レーザーを導入すると共に、各シードレーザー波長に於いて我々のデュアルコム分光システムで計測されたコムスペクトルのデュアルコム信号強度を調べた(図7)。

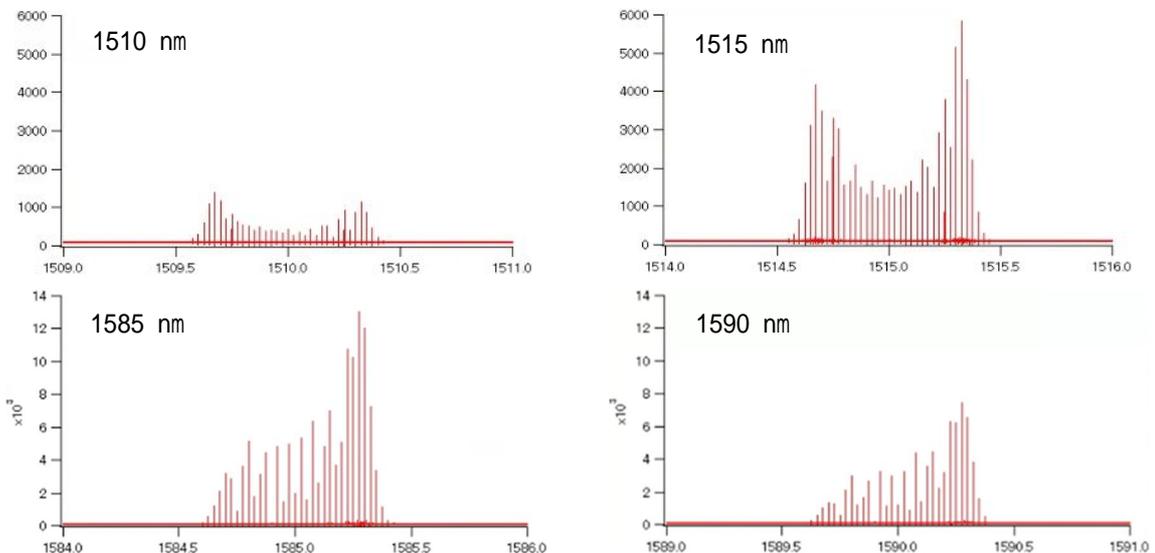


図7 . デュアルコム信号強度のシードレーザー波長依存性

レーザーの波長可変範囲下限の 1510 nm ではデュアルコム信号は小さくなるがスペクトルの形は保たれており分光計測に用いる事が出来るが、長波長側になるに従ってコムスペクトルの短波長側成分の強度が下がってしまうので、分光計測に用いる事が出来る波長範囲は 1510-1585 nm である事が判った。

(4) ヘリオットセルによる吸収線スペクトル計測の高感度化

我々の自動補間デュアルコム分光計測装置と光路長 80 cm のガスセルを用いて、腎臓病のバイオマーカーであるアンモニアガススペクトルの濃度 300 ppm での計測に成功していたが、呼吸分析による疾病診断に用いる為には ppm レベルのさらなる高感度化が必要となる。そこで今回、光路長 76 m のヘリオットセルを用いることでさらなる高感度化を目指す研究を行った。その実験系を図 8 に示す。コム光をヘリオットセル内に導入する為に、EOM コム光源の光ファイバーからの出力をレンズでコリメートして空間ビームに変換してガスを封入したヘリオットセルを通した後、再びレンズでファイバーに結合してファイバー結合の計測系に導いている。

最初に 0.5 MPa の二酸化炭素ガスの吸収線スペクトルの測定を行った(図 9)。赤線が計測値、青線が HITRAN データベースとの比較であり、大変良い一致が見られた。

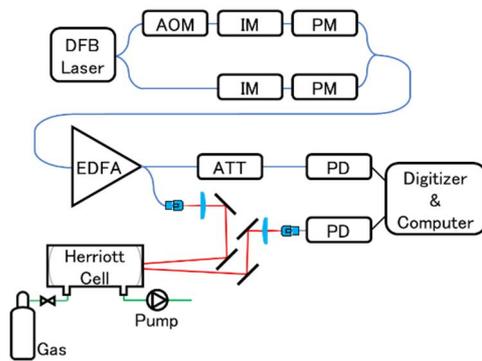


図 8 . ヘリオットセル実験系

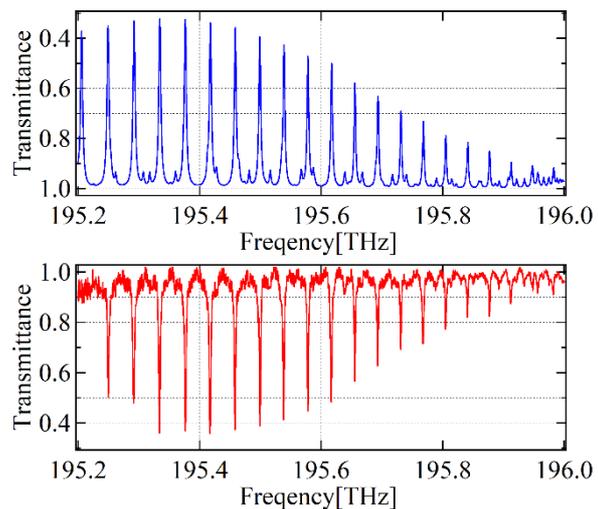


図 9 . 二酸化炭素ガスの吸収線スペクトル

次に、アンモニア濃度が 10 ppm になるように調整したアンモニアと窒素との 1 気圧の混合ガスの計測を行った。図 1 0 にその結果を示す。アンモニアの吸収線を捉える事は出来たが、ベースラインに 21 GHz 周期のフリンジが乗ってしまった。このフリンジの発生原因が突き止められなかったので、計算でノッチフィルターを掛けてフリンジ成分を除去したところ、図 1 1 のように HITRAN データベースのデータと比較しうるアンモニアガスの吸収線スペクトルを得る事が出来た。これにより、アンモニアガスに対する 10 ppm の計測感度を十分に達成することが出来た。今後は発生したフリンジの原因を突き止めて取り除き、さらなる感度向上を図りたい。

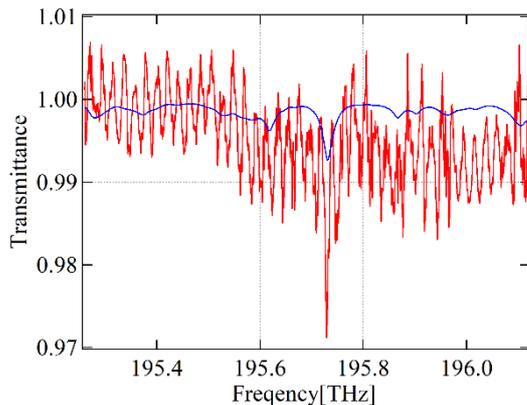


図 1 0 . アンモニアガス吸収線スペクトル

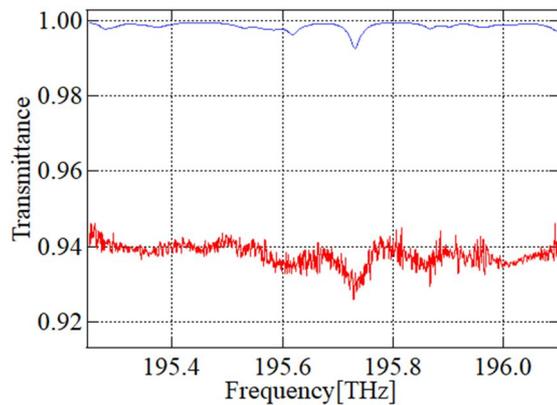


図 1 1 . ノッチフィルターを掛けたスペクトル

以上、我々が新たに開発を行った電気光学変調光周波数コムを用いたリアルタイム計測装置により、1510-1585 nm の広い波長範囲に渡るデュアルコム分光計測が可能となり、アセチレンガスの吸収線スペクトルを 9.3 ms の計測時間に於いて 350MHz の絶対光周波数精度で計測し、アンモニアガスの吸収線スペクトルを 10 ppm の感度で計測する事が出来るようになった。

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 1件）

1. 著者名 Ishizawa Atsushi, Kawashima Kota, Kou Rai, Xu Xuejun, Tsuchizawa Tai, Aihara Takuma, Yoshida Koki, Nishikawa Tadashi, Hitachi Kenichi, Cong Guangwei, Yamamoto Noritsugu, Yamada Koji, Oguri Katsuya	4. 巻 30
2. 論文標題 Direct f-3f self-referencing using an integrated silicon-nitride waveguide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 5265 ~ 5265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.449575	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 石澤 淳、西川 正、日達 研一、後藤 秀樹	4. 巻 103
2. 論文標題 電気光学変調コム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 1097-1104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Koki Yoshida, Atsushi Ishizawa, Rai Kou, Xuejun Xu, Tai Tsuchizawa, Takuma Aihara, Yugo Kikkawa, Tadashi Nishikawa, Kenichi Hitachi, Guangwei Cong, Noritsugu Yamamoto, Koji Yamada, Katsuya Oguri
2. 発表標題 Dependence of supercontinuum light on incident laser polarization and dispersion-controlled SiN waveguides
3. 学会等名 International Symposium on Novel materials and quantum Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, K. Yoshida, H. Gotoh, and K Oguri
2. 発表標題 Tunable generation of low-phase-noise microwave signals
3. 学会等名 2021 International Topical Meeting on Microwave Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Ishizawa, Kota Kawashima, Rai Kou, Xuejun Xu, Tai Tsuchizawa, Takuma Aihara, Koki Yoshida, Tadashi Nishikawa, Kenichi Hitachi, Guangwei Cong, Noritsugu Yamamoto, Koji Yamada, and Katsuya Oguri
2. 発表標題 Simple method of carrier-envelope-offset locking with f-3f self-referencing solely by a dispersion-controlled silicon-nitride waveguide
3. 学会等名 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金川誠矢、村山大誠、森田拓海、石澤淳、西川正
2. 発表標題 ヘリオットセルを用いたデュアル電気光学変調コム分光の高感度高速計測
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 吉田光貴、石澤淳、高磊、徐学俊、吉川優剛、土澤泰、相原卓磨、西川正、コン グァンウェイ、日達研一、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 25 GHz繰り返しフェムト秒光パルスを用いた2/3オクターブ帯域光発生
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 吉田光貴、石澤淳、高磊、徐学俊、吉川優剛、土澤泰、相原卓磨、西川正、日達研一、コン グァンウェイ、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 マルチモード化したSiN導波路による非線形光学効果の増強
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田光貴、石澤淳、高磊、徐学俊、吉川優剛、土澤泰、相原卓磨、西川正、コン グァンウェイ、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 SiN導波路による広帯域光の可視光強度増大
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石澤淳、西川正、日達研一、後藤秀樹、小栗克弥
2. 発表標題 電気光学変調コムによる低雑音マイクロ波発生
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島滉太、石澤淳、高磊、徐学俊、土澤泰、相原卓磨、西川正、コングァンウェイ、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 分散制御Si3N4導波路を用いた2オクターブ光発生
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島滉太、石澤淳、高磊、徐学俊、土澤泰、相原卓磨、西川正、コングァンウェイ、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 SiN導波路の分散制御による非常に簡便なキャリアエンベロープオフセット周波数検出
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田光貴、石澤淳、西川正、小栗克弥
2. 発表標題 電気光学変調コムを用いた低雑音マイクロ波発生
3. 学会等名 第五回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川島滉太、石澤淳、高磊、徐学俊、土澤泰、相原卓磨、西川正、コングアンウェイ、山本宗継、山田浩治、小栗克弥
2. 発表標題 分散制御SiN導波路を用いた高効率2オクターブ帯域光発生
3. 学会等名 第五回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Hitomi, A. Ishizawa, K. Hitachi, T. Akatsuka, T. Nishikawa, and H. Gotoh
2. 発表標題 Dispersion Adjustment of Electro-optic-modulation Comb
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Aragaki, K. Hitachi, A. Ishizawa, T. Nishikawa, H. Gotoh, and K. Oguri
2. 発表標題 Propagation and Confinement of Acoustic Phonons in InGaAsP Multiple Quantum wells
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenya Hitomi, Atsushi Ishizawa, Kenichi Hitachi, Tomoya Akatsuka, Tadashi Nishikawa, and Hideki Gotoh
2. 発表標題 Dispersion dependence of noise characteristics of an electro-optic-modulation comb
3. 学会等名 Photonics WEST OPTO 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日達研一、佐々木健一、新垣駿太郎、石澤淳、西川正、後藤秀樹
2. 発表標題 多重量子井戸の時間分解反射率：転送行列による音響フォノン伝搬の解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 人見賢弥、石澤淳、日達研一、赤塚友哉、西川正、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調コム位相雑音における分散依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原憲、宇田祥平、石澤淳、日達研一、Picque Nathalie、Haensch Theodor、西川正
2. 発表標題 デュアルEOMコム分光の自動補間法によるアセチレン吸収線スペクトル測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石澤淳、人見賢弥、日達研一、赤塚友哉、西川正、後藤秀樹
2. 発表標題 空洞共振器オシレーター駆動E0コムのCE0信号を用いた低ノイズマイクロ波発生
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石澤淳、西川正、日達研一、後藤秀樹
2. 発表標題 高精度な時刻周波数同期のための光電変換技術
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石澤淳、西川正、日達研一、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調コムを用いた高精度周波数変換
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石澤淳、人見賢弥、日達研一、西川正、後藤秀樹
2. 発表標題 電気光学変調コム
3. 学会等名 デバイス光コム研究会（招待講演）
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
研究分担者	石澤 淳 (ISHIZAWA Atsushi) (30393797)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員 (92704)	
研究分担者	日達 研一 (HITACHI Kenichi) (60564276)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員 (92704)	削除：2019年11月28日

	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
研究協力者	大原 憲 (OOHARA Akira)		
研究協力者	森田 拓海 (MORITA Takumi)		
研究協力者	村山 大誠 (MURAYAMA Taisei)		

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
---------	---------