

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.7 光計測技術・機器

2025年3月15日(土) 9:00 ~ 12:15 会 K304 (講義棟)

[15a-K304-1~11] 3.7 光計測技術・機器

加藤 峰士(電通大)、南川 丈夫(阪大)

◆ 奨励賞エントリー

9:00 ~ 9:15

[15a-K304-1]

THz コム周波数適倍とデュアル光コム温度補償の融合による 屈折率センシング光コムの感度増大と温度補償の両立

○檜垣 将之¹、宮村 祥吾¹、田上 周路²、時実 優³、長谷 栄治³、南川 丈夫^{3,4}、安井 武史³ (1.徳島大院創成、2.高知工科大、3.徳島大 pLED、4.阪大院基礎工)

◆ 奨励賞エントリー

9:15 ~ 9:30

[15a-K304-2]

デュアルコム分光法による多成分ガスに適用可能な温度測定法の開発

○武子 尚生¹、内山 竜成¹、宮崎 俊行¹、窪田 光佑¹、杉山 陽平²、洪 鋒雷²、中嶋 善晶¹ (1.東邦大理、2.横国大)

9:30 ~ 9:45

[15a-K304-3]

SSB変調器を用いた自動補間デュアルEOコム分光システムによる吸収線の取得

○(M1)穴戸 彩光¹、野坂 将¹、石澤 淳²、西川 正¹ (1.東京電機大、2.日本大)

9:45 ~ 10:00

[15a-K304-4]

対称的光コム間隔掃引とフーリエ変換法を併用した高速3次元形状計測

○(M1C)三浦 颯太¹、鈴木 孝昌¹、崔 森悦¹ (1.新潟大院自然研)

◆ 奨励賞エントリー

10:15 ~ 10:30

[15a-K304-5]

多重置換CO₂分子分析のための中赤外キャビティリングダウン分光システムの開発○柘植 紘汰¹、高山 恵理佳¹、橋本 大輝¹、植村 立¹、阿部 理¹、富田 英生¹ (1.名古屋大)

10:30 ~ 10:45

[15a-K304-6]

呼気診断に向けた8-12 μm 中赤外光源の高出力化

○寺蘭 隆之¹、秋山 由洸¹、遠藤 翼¹、小林 洋平¹ (1.東大物性研)

10:45 ~ 11:00

[15a-K304-7]

スペクトルピークを用いた気体分子の高選択分光計測技術の開発

○伊東 優¹、北島 将太郎¹、富田 英生¹、阿部 恒²、西澤 典彦¹ (1.名大院工、2.産総研)

◆ 奨励賞エントリー

11:00 ~ 11:15

[15a-K304-8]

流星起源カルシウム原子・イオンの同時観測

○橋本 彩香¹、小林 蒼汰¹、三好 咲也子¹、宮城 晃²、大饗 千彰³、桂川 眞幸^{1,2,3,4}、江尻 省^{4,5}、中村 卓司^{4,5} (1.電通大基盤理工、2.電通大情報理工、3.電通大量子センター、4.極地研、5.総研大)

11:30 ~ 11:45

[15a-K304-9]

オープンパス大気計測に向けた可搬型光周波数コムの開発

○光本 涼¹、吉井 一倫¹、山本 伸一¹ (1.龍谷大理工)

11:45 ~ 12:00

[15a-K304-10]

光コムによる全光ヒルベルト変換で求めたスペクトル干渉の振幅・位相画像を用いた瞬時3次元計測手法

○加藤 峰士¹、小椋 胡太郎¹、美濃島 薫¹ (1.電通大)

12:00 ~ 12:15

[15a-K304-11]

デュアルコム非同期光サンプリング技術を用いた広時間ダイナミックレンジなOAM依存時間分解測定法

○浅原 彰文^{1,2}、美濃島 薫¹ (1.電通大、2.JSTさきがけ)

THz コム周波数通倍とデュアル光コム温度補償の融合による 屈折率センシング光コムの感度増大と温度補償の両立

Sensitivity enhancement and temperature compensation in refractive-index sensing optical comb through integration of THz comb frequency multiplication and dual-comb temperature compensation

¹徳島大院創成, ²高知工科大, ³徳島大 pLED, ⁴阪大院基礎工

○檜垣将之¹, 宮村祥吾¹, 田上周路², 時実悠³, 長谷栄治³, 南川丈夫^{3,4}, 安井武史³

¹Grad. Sch. Sci. Tech. Innov., Tokushima Univ., ²Koch Univ. Tech.,

³pLED, Tokushima Univ., ⁴Grad. Sch. Engg. Sci., Osaka Univ.

○M. Higaki¹, S. Miyamura¹, S. Taue², Y. Tokizane³, E. Hase³, T. Minamikawa^{3,4}, and T. Yasui³

E-mail: c612332008@tokushima-u.ac.jp yasui.takeshi@tokushima-u.ac.jp

電気周波数読み出し型ファイバー屈折率センサーである屈折率センシング光コムは、ファイバー光コム共振器内にマルチモード干渉 (MMI) ファイバーセンサーを組み込むことで、屈折率変化を光スペクトルから光コム繰り返し周波数 (f_{rep} : 数十 MHz) に変換することによって (光/電気周波数変換), 電気周波数信号として高精度計測を行う手法である[1]. これまでに、THz コムの周波数通倍により高感度・高速計測化を実現したが[2], 高精度計測の妨げとなる f_{rep} の温度ドリフトの対策が不十分であった. そこで本研究では、機械共有型デュアル光コム構成[3]を用いたアクティブ・ダミー温度補償[4]との融合により、温度ドリフトを低減させながら屈折率計測の高度化の両立を目指す.

本実験のセットアップを図 1(a)に示す. 本実験では原理確認のためそれぞれの光コムを同一の THz コム周波数通倍セットアップに接続した. まず、アクティブ・ダミー温度補償の効果を調べるためにデュアル光コムの f_{rep} の時間変化を計測した (図 1(b)). 各 f_{rep} の差である Δf_{rep} を計測することで温度ドリフトの効果を抑制できていることが確認できた. 次に各光コム (comb1, comb2) から得られるビート信号を計測したところ図 1(c)のようになり、高い S/N 比 (約 40dB) でビート信号が計測できた.

講演では、セットアップをデュアル化し、各光コムから得られるビート信号を同時計測することによる、センサー信号の増幅と温度補償の同時実現に関して報告する予定である.

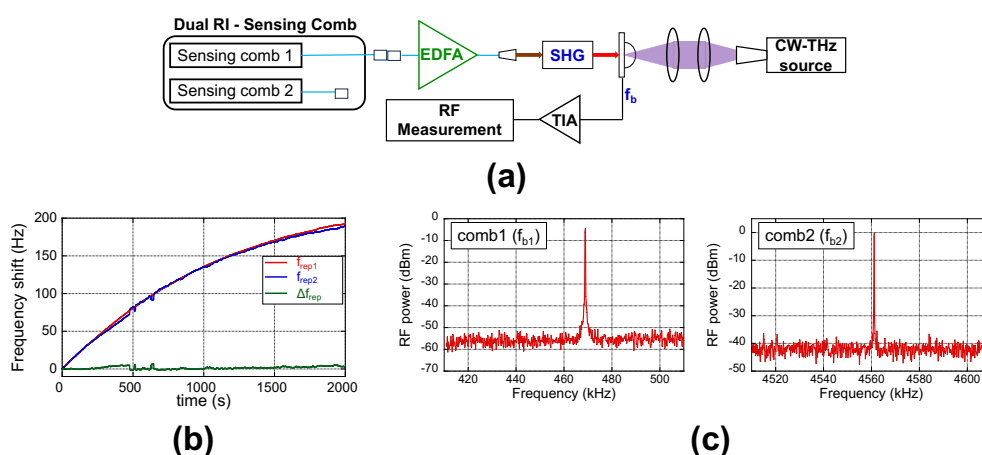


Fig.1. (a) Experimental Setup, (b) Temperature drift of f_{rep} and Δf_{rep} , (c) RF spectrum of f_b signal

[1]. R. Oe *et al.*, Opt. Express. **26**, 19694-19706 (2018).

[2]. M. Higaki *et al.*, Opt. Express **32**, 49164-49175 (2024).

[3]. Y. Nakajima *et al.*, Opt. Letters **46**, 5401-5404 (2021).

[4]. S. Miyamura *et al.*, J. Lightwave Technol. **42**, 6387-6394 (2024).

デュアルコム分光法による多成分ガスに適用可能な温度測定法の開発 Development of a temperature measurement technique applicable to multi-component gases using dual-comb spectroscopy

東邦大理¹, 横国大² ◯(M1) 武子 尚生¹, (M2) 内山 竜成¹, (B) 宮崎 俊行¹, (M2) 窪田 光佑¹,
(D) 杉山 陽平², 洪 鋒雷², 中嶋 善晶¹

Toho Univ.¹, Yokohama National Univ.², ◯Naoki Takeshi¹, Ryusei Uchiyama¹, Toshiyuki Miyazaki¹,
Kousuke Kubota¹, Yohei Sugiyama², Feng-Lei Hong², Yoshiaki Nakajima¹

E-mail: yoshiaki.nakajima@sci.toho-u.ac.jp

デュアルコム分光法は 2 台の光コムを用いて分光することにより広帯域スペクトルを高速かつ高分解能に取得可能な分光法である。デュアルコム分光を用いた応用計測として、 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ガスの吸光度スペクトルの形状が Boltzmann 分布に従うことから温度推定を行う回転準位分布温度測定法(RDT)が実証されてきた¹⁾。しかし、RDT 法は $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ 分子に対してモデルが最適化されており、他の分子に対して適用が困難であった。そこで我々は新たな解析モデルとして Integration Log RDT (ILRDT)法を提案する。本手法は観測される分子吸収線の面積が対数スケール上で温度に逆比例することから温度決定される。本研究では、 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ガスと H^{13}CN ガスの同時分光計測を行い、ILRDT 法の適用を試みた。

Fig. 1(a)に示すのはデュアルコム分光のセットアップであり、繰り返し周波数(f_{rep})は約 100 MHz である。 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ガスと H^{13}CN ガスの吸収線を同時に観測できるように 2 つの光コムの f_{rep} の差(Δf_{rep})を 407 Hz に設定した。取得したインターフェログラムから吸光度スペクトルを取得するために簡易規格化手法²⁾を用いて、透過率スペクトルを取得した。Fig. 1(b)に示すのは ILRDT 法による解析結果であり、良い線形性が確認できる。推定された温度はガスセルに設置した温度センサの温度 21.7 ± 0.5 °C に対して $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ガスが 21.9 °C, H^{13}CN ガスが 21.2 °C と決定された。本研究は NEDO の研究助成を受けて行われた。

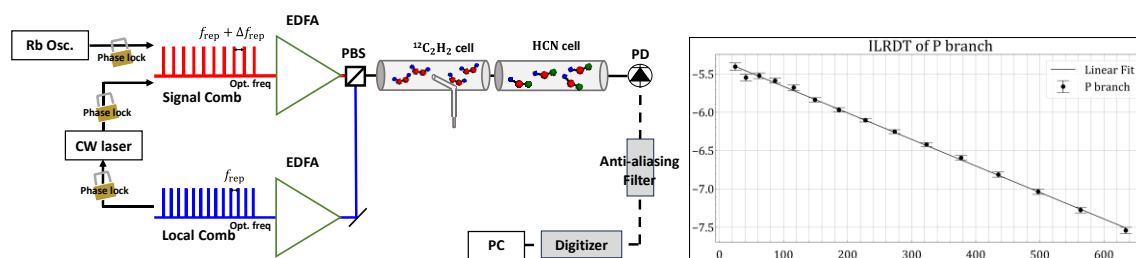


Fig. 1 (a) Experimental Setup

(b) Integration Log RDT analysis for P branch of H^{13}CN

- 1) Y. Shimizu, et al., Appl. Phys. B **124**, 71 (2018).
- 2) N. Takeshi, et al., CLEO-PR, Tu2E-5 (2024).

SSB 変調器を用いた自動補間デュアル EO コム分光システムによる吸収線の取得 Acquisition of absorption line by automatic interpolation in dual EO comb spectroscopy utilizing an SSB modulator

○(M1) 宍戸 彩光¹, (B) 野坂 将¹, 石澤 淳², 西川 正¹

(東京電機大¹, 日本大²)

S. Shishido¹, S. Nosaka¹, A. Ishizawa², T. Nishikawa¹

(Tokyo Denki Univ.¹, Nihon Univ.²)

E-mail: 24kmh06@ms.dendai.ac.jp

1. 研究背景・成果

近年、デュアル電気光学変調 (EO) コム分光法が簡便でロバストな新たな分光分析技術として注目されており、呼気分析等への応用が期待される。高性能な分析を行うためには、モード間隔を広くとって光周波数コム全体の波長帯域幅を確保しつつ間を補間する必要がある。先行研究では、レーザー駆動電流を変化させレーザー発振波長自体を制御する事で光コム全体の周波数をシフトする自動補間法を実現した。[1]しかし駆動電流とレーザー波長の関係は温度等の環境に依存し、制御の正確性に欠けていた。本研究では、レーザー発振波長は固定し、SSB 変調器 (SSBM) を周波数シフタとして用いる自動補間システムの構築を行い、HCN の吸収線スペクトルを取得した。

2. 実験方法

Fig. 1 に本研究の実験系を示す。シードレーザーとして波長 1532 nm の DFB レーザー光を SSBM に入力し、SSBM 出力光を二分岐させて、それぞれに強度・位相変調を加えて EO コムを生成する。各モード間隔は EOM を駆動する信号発生器の出力周波数に依存し、ここでは 25 GHz および $25 \text{ GHz} + 0.35 \text{ MHz}$ とした。

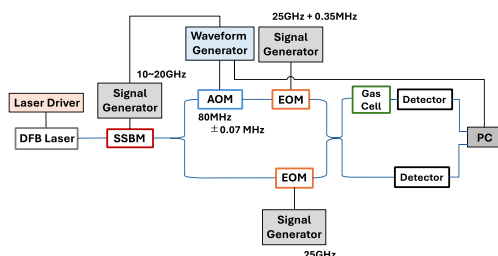


Fig. 1. Experimental setup

高性能に分子分光分析を行うためには、光周波数コム全体のモード間隔を広く保つことで波長帯域幅を確保しながら広い輝線スペクトルの間を補間する必要がある。そこで、SSBM を駆動する信号発生器周波数を 10~20 GHz 線形に変化させ、EO コム全体の周波数をシフトし

ながら、それに対応してマイクロ波領域のシフトを担う AOM (Acousto-Optic Modulator) 駆動波形発生器の同期を取ってスキャンを行った。ガスセルとして光路長 16.5 cm, 25 Torr (0.0329 atm) の HCN を用いた。光検出器で取得した信号をフーリエ変換し、ガスセル透過光を参照光で除算して吸収線スペクトルを算出した。データの取得には、サンプル数とサンプリングレートから算出される 84 msec に SSBM 駆動信号発生器のセトリング時間 24 msec を加算した 108 msec を要する。

3. 実験結果

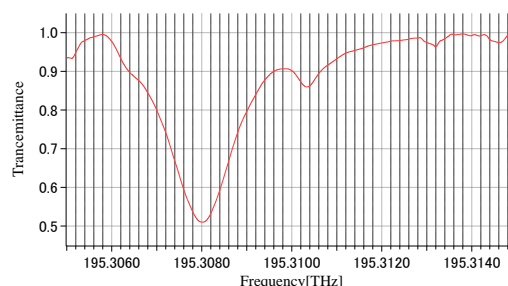


Fig. 2. Absorption spectrum of HCN

0.0329 atm の HCN 吸収線スペクトルを Fig. 2 に示す。195.3103 THz 付近と 195.3132 THz 付近の吸収線スペクトルにディップが含まれるが、これは使用した SSBM 駆動信号発生器の仕様上、バンド切り替え時に周波数掃引が停止してしまうため生じたものである。また、10GHz を超える周波数掃引を行うと SSBM 駆動信号発生器の出力 RF 信号に瞬断が生じるため本研究では 10 GHz の補間を行ったが、25 GHz 以上瞬断なく掃引する機能を有する信号発生器を用いれば本システムで直ちにモード間隔全体の補間が可能となる。

本研究の一部は、東京電機大学総合研究所研究 Q23E-01, JSPS 科研費 24K01388 の助成を受けたものである。

[1] 大原 憲 他, 2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-E205-7 (2019).

対称的光コム間隔掃引とフーリエ変換法を併用した高速3次元形状計測 High-speed 3D profile measurement based on symmetric comb interval sweep combined with Fourier transform method

新潟大院自然研[○](M1C)三浦 颯太, 鈴木 孝昌, 崔 森悦

Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ.

E-mail: schoi@eng.niigata-u.ac.jp

1. 研究背景

光干渉計測技術は産業、生物学分野等、多岐に渡って重要性が増している。筆者らはこれまで nm 精度のレーザ変位計と μm 精度の3次元コヒーレンス顕微鏡の機能を融合する広帯域マルチギガヘルツコム光源を用いた新たな干渉計測法を提案した[1]。さらに、正弦波位相変調法を導入することで測定不能点の課題を克服し、Full-field 形状計測を実現した[2]。しかし、位相変調信号のサンプリングは撮像枚数の増大に繋がり膨大な量のデータ解析を要した。本研究では、撮像枚数の節約と信号処理の簡素化のために、フーリエ変換法[3]を取り入れた形状復元法を提案する。この手法は、対称的コム間隔走査によって実現できる位相定在の干渉縞パターンの特性を活用して周波数間隔掃引回数と撮像枚数を大幅に節約できるため、従来法よりも高速な計測が期待できる。

2. 実験方法及び結果

Fig.1 に実験系を示す。波長 1560 nm の CW レーザから Dual drive Mach-Zehnder modulator (DD-MZM)型光コム発生器を通してコム間隔 10 GHz の光コムを生成し、高出力 EDFA 及び非線形分散シフトファイバによる非線形効果によって帯域幅 40 nm まで広帯域化した。コム間隔は RF シグナルジェネレータによって 9.995 GHz から 10.005 GHz まで 10 MHz の範囲で掃引できた。生成した広帯域マルチギガヘルツコムをマイケルソン型の干渉顕微鏡に入射し、測定物体の干渉像を対物レンズおよび結像レンズを通して赤外高速 CMOS カメラにより取得した。

Fig.2 に膜厚約 100 μm のガラス板のフルフィールド断層計測結果を示す。光路差を 1246 mm とすることで、深さ方向の測定レンジ約 630 μm を達成した。

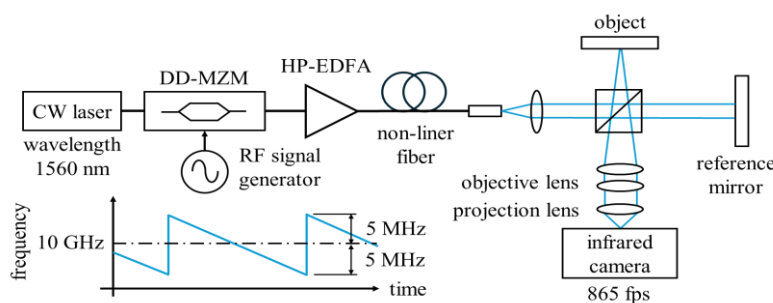


Fig. 1 実験系, 広帯域マルチギガヘルツコムと干渉顕微鏡

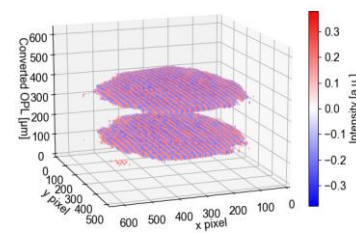


Fig.2 計測結果 (膜厚 100 μm のガラス板の3次元断層分布), 反射面での干渉縞の位相は定在するためフーリエ変換法が適用可能。

3. まとめ

本研究では、DD-MZM と非線形光学効果によって広帯域化した光コムを用いて、ガラス板の3次元断層を計測した。さらに、収録した各フレームの2次元FFTによって深さに応じた位相分布と干渉強度分布が得られ、これらを基に3次元形状を復元した。フーリエ変換法によっても同様な3次元断層分布が再現できることを確認し提案手法の有用性を示した。

謝辞 本研究は科研費 24K21607 の助成によって行われた。

参考文献

- [1] S. Choi, T. Ota, F. Nin, T. Shinoda, T. Suzuki, H. Hibino, "Rapid optical tomographic vibrometry using swept multi-gigahertz comb," *Opt. Exp.*, **29**(11), 16749-16768 (2021).
- [2] S. Choi, T. Yamazaki, H. Hibino, T. Suzuki, T. Shioda, "Phase sensitive surface profile measurement using swept multigigahertz supercontinuum comb," CThA6D-04, CLEO-PR2022, Sapporo, Japan (2022).
- [3] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based tomography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **72**(1), 156-160 (1982).

多重置換 CO₂ 分子分析のための 中赤外キャビティリングダウン分光システムの開発

Development of mid-infrared cavity ring-down spectrometer for clumped CO₂ analysis

名古屋大¹, ○ (M2) 柘植 紘汰¹, 高山 恵理佳¹, 橋本 大輝¹,
植村 立¹, 阿部 理¹, 富田 英生¹

Nagoya Univ.¹, ○Kota Tsuge¹, Erika Takayama¹, Daiki Hashimoto¹, Ryu Uemrua¹, Osamu Abe¹,
Hideki Tomita¹

E-mail: h-tomita@energy.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

同位体分子のうち、天然存在比の低い同位体で多重に置換された分子は多重置換同位体分子と呼ばれ、二酸化炭素の多重置換同位体分子を分析することで二酸化炭素の起源や炭酸塩が形成された温度（古水温）の推定などが可能である。軽元素の同位体比分析には、従来、質量分析に基づく手法が広く用いられてきたが、微量な多重置換同位体分子に対して、存在比の大きい同位体分子による同重体干渉により、正確に存在比を測定することが困難であった。一方、レーザー吸収分光法では、分子の光吸収特性に基づいて測定を行うため、より高精度な測定が可能である。そこで、本研究ではレーザー吸収分光法的一种であるキャビティリングダウン分光（Cavity Ring Down Spectroscopy : CRDS）を用いた多重置換 CO₂ 分子の分析システムを開発した。

2. 多重置換 CO₂ 分子分析のための CRDS システムの概要

Fig. 1 に構築した CRDS システムの概要を示す。4 μm 帯には CO₂ の基音吸収があるため、極めて高感度な CRDS を用いることで少量の試料（低濃度 CO₂）に対する分析や、他の吸収分光法では取り扱うことのできない光吸収断面積が小さい吸収線を組み合わせた分析を実現することが可能となる。後者の一例として、多重置換 CO₂ 分子である ¹²C¹⁶O₂ (98.4%), ¹³C¹⁶O₂ (1.11%), ¹²C¹⁶O¹⁸O (3.95%), ¹³C¹⁶O¹⁸O (44.3ppm) を同時に測定可能な中赤外 CRDS システムを構築した。得られた吸収スペクトルを Fig. 2 に示す。光共振器には低熱膨張率ガラスセラミックを用いた。本発表では、連続およびバッチ測定用試料導入系を用いて、本システムの分光性能と同位体分析性能の評価を行った結果を報告する予定である。

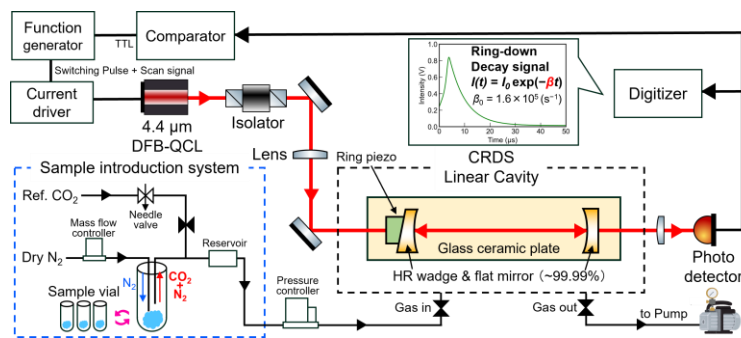


Fig. 1 実験体系

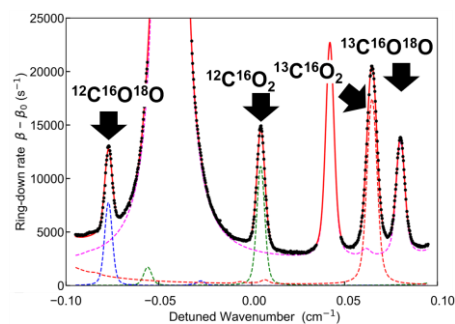


Fig. 2 吸収スペクトル

謝辞：本研究の一部は科研費基盤研究 B (22H03869) の助成を受けたものである。

呼吸診断に向けた 8-12 μm 中赤外光源の高出力化

Power enhancement of a light source for 8-12 μm mid-infrared spectroscopy for breath diagnosis

東大物性研¹, °寺園 隆之¹, 秋山 由洸¹, 遠藤 翼¹, 小林 洋平¹

ISSP, Univ. Tokyo¹, °Takayuki Terazono¹, Yukihiro Akiyama¹, Tsubasa Endo¹, Yohei Kobayashi¹

E-mail: terazono@issp.u-tokyo.ac.jp

呼吸診断は、呼気中に含まれる分子種から非侵襲的に被験者の健康状態を推定する手法として期待されている。その実現には診断時間の短縮と複数分子種の識別が必要なために、高分解能・広帯域かつ高速な測定手法が求められている。分子の振動に由来する吸収線の多くは中赤外領域に存在するため、高速・高分解能の広帯域中赤外分光を行う必要がある。このような背景を受け、本研究室では呼吸診断応用に向けた中赤外分散型分光の構築に取り組んできた[1.2]。これまで 3-5 μm と 8-12 μm 帯域の 2 種類の中赤外光源を開発してきたが、8-12 μm の実験系は出力が弱く、検出感度が低いことが課題となっている。そこで、8-12 μm の光源の高出力化を行い検出感度の向上を試みた。

実験のセットアップを図 1 に示す。繰り返し周波数 100 MHz の Yb 添加ファイバーレーザー光源を光源とした。1 μm の基本波とフォトニック結晶ファイバー(PCF)において発生した白色光のうち 1.1 μm の光を用いた GaSe 結晶中での差周波発生により中赤外光コムを作成した。中赤外光を光路長が 31.2 m のヘリオットセルに入射し、透過光をエシエル回折格子とクロスディスペルザーにより分散させて、中赤外カメラにより検出した。アンモニアを分光した際のカメラ画像を図 2 に示す。実際に、アンモニアの吸収線に対応するコントラストが確認できた。

高出力化を目指す際の大きな課題は 2 つある。1 つ目はポンプ光強度の上昇に伴うアンプの蓄熱、2 つ目は PCF 端面の損傷である。これらの課題に対し Yb 増幅器には熱対策を施し、PCF の損傷は両端にガラスのエンドキャップをつけることで対策した。その結果、端面が損傷することなく強いパワーの光を PCF に入射することが可能になった。PCF エンドキャップ界面における光顕微鏡像を図 3 に示す。コアレスファイバーと PCF がうまく接続し、エンドキャップとして機能した。当日は、高出力化された中赤外光源と実際に測定したガスの分光結果を報告する。

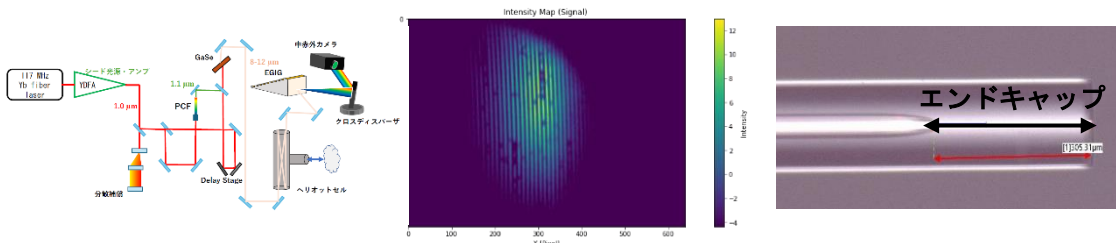


Fig. 1. Experimental setup Fig. 2. Absorption of Ammonia Fig. 3. Optical image of the endcap

[1] 多屋 奏一, 他 第 70 回応用物理学会春季講演会(2023).

[2] 石塚 悠也, 他 第 69 回応用物理学会春季講演会(2022).

スペクトルピークを用いた気体分子の高選択分光計測技術の開発

Development of highly selective spectroscopy of gas molecules using spectral peaks

名大院工¹, 産総研², [○]伊東優¹, 北島将太郎¹, 富田英生¹, 阿部恒², 西澤典彦¹

Nagoya Univ.¹, AIST², [○]Y. Ito¹, S. Kitajima¹, H. Tomita¹, H. Abe², N. Nishizawa¹

E-mail: ito.yu.a9@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年我々は、気体分子による吸収を受けた超短パルスが光ファイバを伝搬する過程で、吸収線が周期的にピークに変換される現象を見出した[1]。この現象は光波長標準や分光計測への有用性が期待されている。これまでに我々は、ガスセルを内包した非線形ループミラー(NOLM)を用いて台座成分を抑圧したスペクトルピークの生成に成功した[2]。本研究では、このNOLMにおいてスペクトルピークの強度が入射光強度に対し非線形に変化することに着目し、特定の分子種のみを選択的に高感度に検出できる、高感度分光計測への応用を試みたので報告する。

2. 実験内容

実験系を Fig. 1 に示す。Er 添加ファイバ増幅器で増幅させた超短パルスファイバレーザの出力を波長 1650 nm にシフトさせた。その後、チョッパーを用いて周期的に数十%の損失を与え、NOLM を用いて波長 1651 nm に強度を変調したスペクトルピークを生成した。ロスの有無を比較したスペクトルピークを Fig. 2 に示す。台座成分の変化は小さいものの、スペクトルピークは強度が大きく変化しているのが分かる。フィルタを使用した後に、空間結合を用いてガスサンプルに透過させた。その透過光をロックインアンプを用いてピークの強度変化を選択的に抽出する。この手法によって、分光器を用いず、吸収スペクトルが一致した分子種のみを選択的に検出することができる。

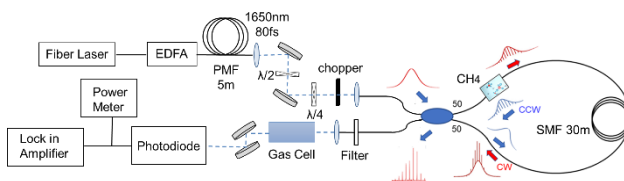


Fig.1 Experimental setup.

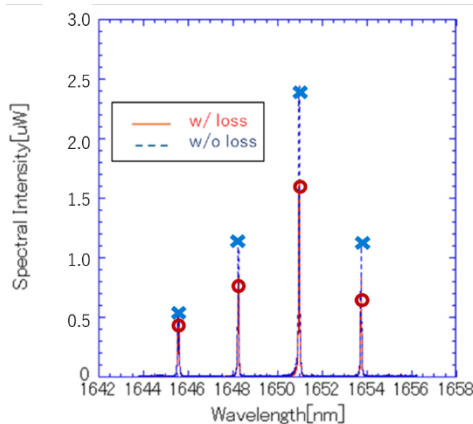


Fig.2 Generated spectral peaks w/ and w/o loss.

3. 結果

ロックインアンプで測定した各種被測定ガスの変調度に対する信号強度比を Fig. 3 に示す。光源には、Fig.2 の 1651 nm のピークのみを用いた。メタンガスが他のガスと比較して信号の変化が大きくなっていることが確認できた。これはメタンガスの吸収スペクトルがスペクトルピークと一致するため、ピーク部分のみの変化が高感度に計測されるためである。また、変調度 10 % の場合が最も選択的に検出できた。

本研究は、JST CREST (JPMJCR2104) の助成を受けて行った。

[参考文献]

[1] N. Nishizawa and M. Yamanaka, *Optica* 7, 1089 (2020).

[2] N. Nishizawa, K. Jung, and S. Kitajima, *Opt. Lett.* 48, 4869 (2023).

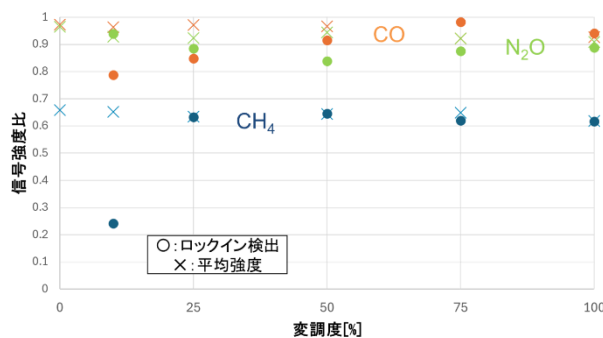


Fig.3 Variation of signal intensity for various gas samples.

流星起源カルシウム原子・イオンの同時観測

Simultaneous observation of meteoric Ca and Ca⁺ based on the resonance-scattering Ca/Ca⁺ lidar

電通大・基盤理工¹, 電通大・情報理工², 電通大・量子センター³

○(D)橋本彩香¹, (M2)小林蒼汰¹, (M1)三好咲也子¹, (B)宮城 晃², 大饗千彰^{1,3}, 桂川真幸^{1,2,3,4}

極地研⁴, 総研大⁵

江尻 省^{4,5}, 中村卓司^{4,5}

Dep. of Eng. Sci.¹, Sch. of Info. & Eng.², Inst. for Adv. Science³, Univ. of Electro-Comms.

Ayaka Hashimoto¹, Sota Kobayashi¹, Sayako Miyoshi¹, Hikaru Miyagi², Chiaki Ohae^{1,3}, Masayuki Katsuragawa^{1,3,4}

National Inst. of Pol. Res.⁴, The Grad. Univ. for Adv. Studies⁵

Mitsumu K. Ejiri^{4,5}, Takuji Nakamura^{4,5}

E-mail: hashimoto@mklab.es.uec.ac.jp

地上から高度 80 - 120 km に位置する高層域は、大気が中性から電離大気へと遷移する領域にあたり、地球大気全体の振舞いを理解する上で重要な位置づけにある。この遷移領域には地球に振込む流星を起源とする金属原子・イオンが常時分布している。地上から打ち上げるレーザー光を用いてその原子・イオンからの共鳴散乱光を再び地上で捉える計測法（共鳴散乱ライダー）は、この遷移領域を観測する重要な計測手法の一つとなっている。Fe, Na が主要なターゲットとされているなか、我々は Ca に焦点をあて、その計測を可能とするレーザーシステムを開発してきた。Ca が唯一、中性原子とイオンの両状態の地上からのライダー計測を可能とする共鳴遷移（Ca: 422.7918 nm, Ca⁺: 393.4770 nm）を持つからである。開発したレーザーは、注入同期法をベースとするチタンサファイア固体レーザーで、目的とする Ca と Ca⁺の共鳴遷移の二波長のレーザー光を単一の共振器から同時に発生できることに際立った特徴をもっている。

ここでは、開発したレーザーシステムを実際に稼働させて、長時間にわたり断続的にテスト観測をおこなった結果（Fig. 1）を報告する。ライダーシステムの送信ビーム出力（平均パワー）、時間分解能、高度分解能は、それぞれ、中性 Ca に対して 0.2 W, 30 s, 15 m、また、Ca イオンに対して 0.4 W, 30 s, 30 m に設定された。同一時空間に分布する中性 Ca と一価の Ca イオンの双方を長時間にわたり初めて詳細に捉えることができた。中性 Ca と Ca イオンが 80 ~ 100 km の主要な層において細部までほぼ同一の時空構造をもつこと、Ca イオンが最も高高度の数 km の層に中性 Ca には見られない高密度分布の層をもつことが明瞭に捉えられた。この高高度の Ca イオンの層は、スプラディック E 層の形成との関連を示唆していると考えられる。

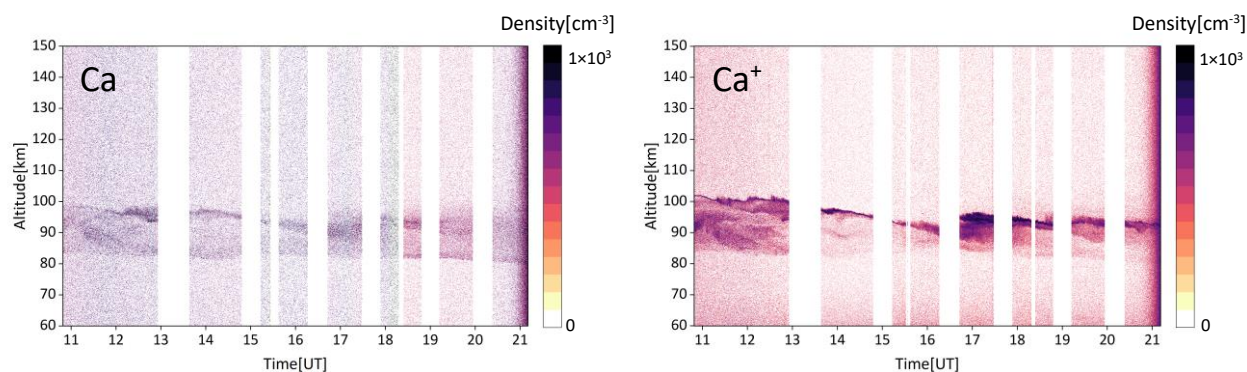


Fig. 1. Simultaneous observation of Ca and Ca⁺ over an entire night (at Tachikawa, Tokyo; Dec. 24, 2024).

オープンパス大気計測に向けた可搬型光周波数コムの開発

Development of a Portable Optical Frequency Comb for Open-Path Atmospheric Measurements

龍谷大理工¹ ○光本 涼¹, 吉井 一倫¹, 山本 伸一¹

Ryukoku Univ.¹ ○Ryo Mitsumoto¹, Kazumichi Yoshii¹, Shin-ichi Yamamoto¹

E-mail: y24d001@mail.ryukoku.ac.jp

近年、光を用いた環境計測分野において、光周波数コム(光コム)の応用が注目されている。しかし、それらの研究例の多くは、温度や振動などの外乱が制御された実験室内で実施されている。そのような中、米国国立標準技術研究所のグループは、建物内に設置した光コムによる数 km に及ぶオープンパス大気計測 [1]や、トレーラー内に搭載した光コムによる実験室外での大気分析を実現 [2, 3]している。国内でも農地や工場などでの大気計測の需要が高まる中、光コムを光源としたこれらの報告は未だ少ない。そこで本研究では、オープンパス大気計測への応用が可能な可搬型光コムシステムの開発を目指した。

本研究で開発した可搬型光周波数コムシステムを Fig.1(a)に示す。光源として、繰り返し周波数 250 MHz の全偏波保持エルビウムファイバーコムを使用した。出射光を偏波保持エルビウム添加ファイバー増幅器 (PM EDFA) で増幅した後、偏波保持高非線形ファイバー (PM HNLF) に入射することで、1-2 μm 帯のスーパーコンテニューム光(SC 光)を生成した。SC 光の出力は最大約 190 mW であった。Fig.1(b)に示すように実験構成を 19 インチラックハードケースに収容することで、装置の可搬性を大幅に向上させた。SC 光をビームエキスパンダーにより拡大し、屋外に出射した後、レトロリフレクターで反射させ、分光器を用いてスペクトルを測定した(Fig.1(c))。発表では、開発した可搬型光コムシステムの実験室外における長期安定性と分光器を用いた分光結果についても報告する。

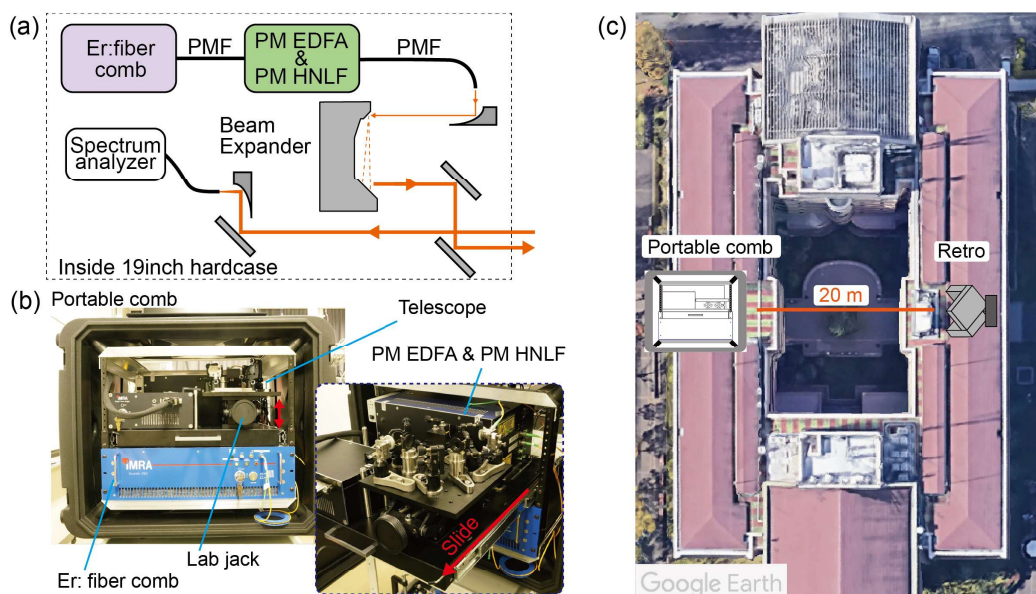


Fig.1 (a) Schematic diagram of portable optical frequency comb setup. (b) Photograph of the optical frequency comb housed in a 19" hardcase. (c) Aerial photograph of Building 1 at Ryukoku University's Seta Campus. SC light passed through the window, propagated through the air, and reflected by the mirror.

参考文献

- [1] G. Ycas, *et al.*, *Optica*, **6**, 165 (2019).
- [2] L. C. Sinclair, *et al.*, *Opt. Express*, **22**, 6996 (2014).
- [3] D. I. Herman, *et al.*, *Science Advances*, **7**, 9765 (2021).

光コムによる全光ヒルベルト変換で求めたスペクトル干渉の 振幅・位相画像を用いた瞬時 3 次元計測手法

One-shot 3D imaging using amplitude and phase images of spectral interference

obtained by all-optical Hilbert transform using optical frequency comb

電通大¹, ○加藤 峰士¹, 小椋 胡太郎¹, 美濃島 薫¹

The Univ. of Electro-Communications (UEC)¹

○Takashi Kato¹, Kotaro Ogura¹ and Kaoru Minoshima¹

E-mail: k.minoshima@uec.ac.jp

近年の工学・産業における高精度な瞬時 3 次元計測手法の需要に対し、我々はチャープした超短パルスを用いた時間・空間・周波数情報の瞬時変換手法[1]に基づき、実用性の優れたファイバレーザによる光コムのスペクトル干渉を用いた瞬時 3 次元計測手法を開発した。これは、形状および内部情報を sub- μm の不確かさで取得可能な手法であり[2, 3]、光演算による高解像度 2 次元分光法を新たに開発することで画像素子と同等の空間解像度を有する瞬時 3 次元計測を開発・実現した[4]。本研究では、ヒルベルト変換時に同時に取得できる位相画像を計測することで nm オーダーの 3 次元計測を行い、同時に得られる振幅情報から波長レベルでの形状情報を得ることで、結果的に μm 以上の計測範囲で nm オーダーの不確かさを有する瞬時 3 次元計測が可能であることを実験的に検証するため、位相画像を用いたミラー面の精密 3 次元計測を行った(図 1)。

実験では Er ファイバコムの繰り返し周波数を約 51 MHz で安定化し、参照光と物体光をそれぞれ SMF と DCF でチャープさせて 9 ps と 16 ps のチャープパルスを発生させた。次に、干渉画像の振幅と位相を瞬時に取得するためには全帯域で互いに直交した位相を持つ位相差パルス対を生成する必要があるが、これには繰り返し周波数とキャリアエンベロープオフセット周波数の比を 4:1 に安定化することで、隣り合うパルス間の位相が常に 90 度となる状態を生成できることを利用した。このパルス列を 2 分岐して片方にパルス間隔分の遅延を加えることで 90 度位相差パルス対を生成し、これを参照光として物体光と干渉させて、干渉画像を計測した。実験ではミラー面の 3 次元像に設計値 0.7 μm の正弦波変位を与え、その変動を 3 次元動画として撮影した。計測した結果、3 次元像は 1 μm 程度の環境変動を受けながら正弦波的に変動し、周波数解析の結果、0.06 1/flame の周波数で 0.2 μm の変位を計測することができた。この時、波長情報は干渉画像の振幅強度比と波長の関係から 1.5 μm と求めた。波長情報の決定精度さらに向上させることにより、1 波長以上の高さ構造を持つ複雑形状の広ダイナミックレンジ計測が可能となる。

[1] K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang, and T. Yagi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, L1348–L1351 (1994).

[2] T. Kato, M. Uchida, and K. Minoshima, *Sci. Rep.*, **7**(1), p. 3670 (2017).

[3] T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, *OSA Continuum*, **3**(1), 20–30 (2020).

[4] T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, and K. Minoshima, *arXiv:2006.07801* (2020).

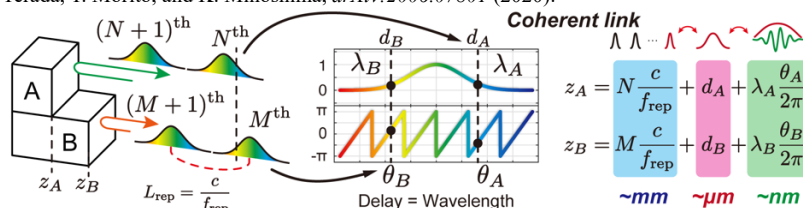


図 1 波長と位相を用いた距離計測を同時に行い、広ダイナミックレンジ計測を実現する手法の概念図

デュアルコム非同期光サンプリング技術を用いた 広時間ダイナミックレンジな OAM 依存時間分解測定法

OAM-dependent Time-resolved Measurement Method with Wide Temporal Dynamic Range using Dual-comb Asynchronous Optical Sampling Technique

○浅原 彰文^{1,2}, 美濃島 薫¹

1. 電通大, 2. JST さきがけ

○Akifumi Asahara^{1,2} and Kaoru Minoshima¹

1. The University of Electro-Communications, 2. JST, PRESTO

E-mail: aki.asahara@uec.ac.jp, k.minoshima@uec.ac.jp

光周波数コム（光コム）は、光波の精密かつ多彩な制御性を有する次世代光源として注目されている。なかでも、繰り返し周波数がわずかに異なる 2 台の光コム（デュアルコム）を用いた非同期光サンプリング (ASOPS) 技術は、2 つの超短パルス列間の自動的な時間掃引により、安定、高速、かつ広時間ダイナミックレンジな時間分解計測を可能にする[1]。一方我々は、光コムの新たな応用展開のひとつとして、光コムと光渦(OAM 光)の概念を組み合わせ、光コムのコヒーレント制御性を時空間次元に拡張した新奇な光波制御・計測技術について研究を行ってきた[2,3]。以上を踏まえ、本研究ではデュアルコム ASOPS 技術に基づいた、OAM 依存現象の広時間ダイナミックレンジな時間分解測定法の開発を目指した。

図 1 に(a)実験系および(b)原理概念を示す。本手法では、同期した 2 台の Er ファイバコム (100 MHz) のうち、片方をポンプ光コム、もう片方をプローブ光コムとして用いた。光渦 ($\ell=+1$) に変換したプローブ光を、図 1(a)のように非対称光励起した半導体試料に透過させた後、各 OAM モード強度の時間発展を ASOPS 法により測定した。これにより、図 1(b)に示すように、OAM スペクトルの超高速過渡応答が、ASOPS 法のもつ 10^5 を超える広時間ダイナミックレンジで測定することが可能となる。講演では、測定結果の詳細を報告する。開発技術は、光の OAM モードに依存した光物性現象[4]の解明など、広範な研究への展開が期待される。

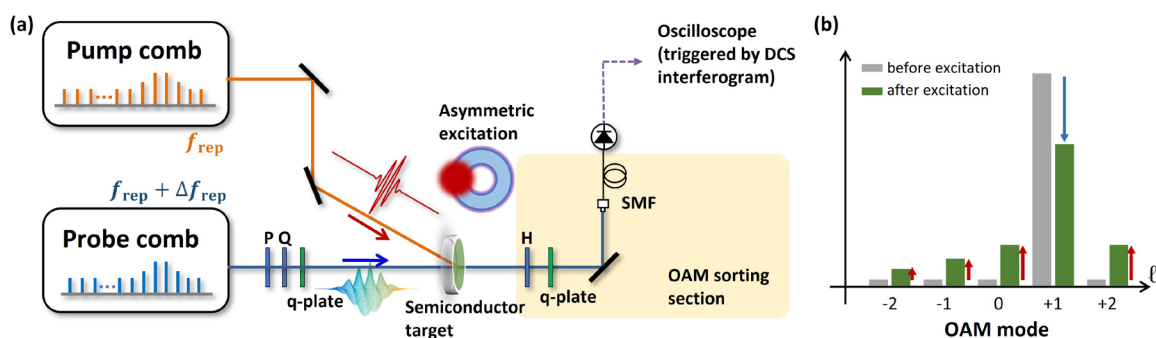


図 1. デュアルコムを用いた OAM 依存時間分解測定のア)実験系および(b)原理概念。

[1] A. Asahara, Y. Arai, T. Saito, J. I.-Hayase, K. Akahane, and K. Minoshima, Appl. Phys. Express **13**, 062003 (2020).

[2] A. Asahara, S. Akiyama, and K. Minoshima, Opt. Express **31**, 11695–11704 (2023).

[3] A. Asahara, R. Zhu, and K. Minoshima, Conference paper of CLEO:2023, SM3O.5 (2023).

[4] K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, and Y. Toda, Phys. Rev. B **93**, 045205 (2016).