

高繰り返しファイバレーザーコムを用いた 1.4 μm 帯 H₂O 吸収によるスペクトルピークの生成

北島 将太郎^A, 坂口 颯太^A, Jung Kwangyun^A, 向井 もも^A, 富田 英生^A,
橋口 幸治^B, 阿部 恒^B, 西澤 典彦^A

Generation of spectral peaks by 1.4 μm H₂O absorption band based on a high repetition rate fiber laser comb

S. Kitajima^A, S. Sakaguchi^A, K. Jung^A, M. Mukai^A, H. Tomita^A,
K. Hashiguchi^B, H. Abe^B, and N. Nishizawa^A

Optical frequency combs are used in a wide range of applications such as spectroscopy, metrology, and frequency standard generation. In order to use them for these applications, it is important to increase the power per comb mode. In this study, we extracted comb modes corresponding to the absorption spectrum of water vapor in the 1.4 μm band utilizing nonlinear fiber loop mirror (NOLM) with a gas cell, and an all polarization-maintaining fiber optical frequency comb with a high repetition rate of 152 MHz. As a result, spectral peaks corresponding to the absorption spectra of water vapor in the wavelength range of 1350 nm to 1420 nm were successfully extracted with a high signal-to-background ratio of 30 dB and peak bandwidth of 50 pm.

Keywords: Optical frequency comb, Fiber laser, Nonlinear optics, Spectroscopy

1 はじめに

光周波数コムとは狭線幅な縦モードが等間隔かつ位相同期された状態で広帯域に存在するスペクトルを持つレーザー光源であり、光の周波数とマイクロ波周波数領域の接続が可能なことから、分光、計測、周波数標準などの幅広い応用に用いられている[1-3]。光周波数コムを精密分光の分野に応用する際、コムモード一本当たりのパワーの低さがしばしば問題となる。光周波数コムのコムモード一本当たりのパワーは、平均出力をコムモードの本数で割ることで得られる。例えばスペクトル幅 10 nm、繰り返し周波数 100 MHz 程度の一般的なファイバ光周波数コムにおいてはコムモード本数

は $\sim 10^4$ 程度であり、コムモード一本当たりのパワーは全体の平均出力の $\sim 1/10^4$ となってしまう。このコムモード出力の低さは狭線幅 CW 光源をコムに同期する際や、コムモードを直接利用した分光の際に SNR を低下させる原因となる。筆者らのグループではこの問題を解決するため、ファイバー中で生じる非線形光学効果である「スペクトルピーキング現象 [4]」を利用することで任意位置の縦モードを自由に取出し、更に増幅することにより、簡便かつ高品質な分光用光源を実現する制御性の高いコム光源の開発を行っている。

スペクトルピーキング現象は、ガス分子の吸収などの狭線幅な強度/位相変調がスペクトル上に加えられた超短パルスレーザー光がファ

著者連絡先 kitajima@nuee.nagoya-u.ac.jp

A 名古屋大学工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市昭和区不老町)

Graduate School of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusaku, Nagoya, Aichi, 464-8603)

B 産業技術総合研究所 計量標準総合センター (〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), National Metrology Institute of Japan (NMIJ) (Tsukuba Central 3, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563)

ファイバーを伝搬すると、超短パルス成分と狭線幅成分の間に非線形位相シフト差が生じ、結果的に二つの成分が建設的干渉を起こしてピークとなる現象である[4,5]. これまでに CH_4 ガス及び HCN ガスの吸収を用いたピーキング[4-6], また LCOS 空間光変調器を用いたピークの生成[7]に成功している. またファイバーではなく非線形性の強い固体レーザー媒質を用いたピーク生成も報告されている[8]. スペクトルピーキング現象を用いたピーク抽出では、原理上超短パルス光にあたる背景光成分がピークと混在して出力されるため、分光などの応用においてはここから更にピーク成分と背景成分を分離する必要がある. これまで我々は非線形偏波回転を用いた方法[9], 非線形偏光干渉ループミラーを用いた方法[10], 更にガスセルを内包した非線形ファイバーループミラー (NOLM) を用いた方法[11]を報告した. ガスセル内包型 NOLM は背景光成分をキャンセルすることでピークのみを取り出すことが可能なため、最も高い信号対背景比(SBR)を得ることができる.

本研究では新たに開発した繰り返し周波数 152 MHz の低ノイズ全偏波保持光周波数コムを光源とし、ガスセル内包型 NOLM を用いることで 1.4 μm 帯水蒸気吸収スペクトルを転写したスペクトルピークの生成を行った. 生成されたスペクトルピークは、1350 nm から 1420 nm までの領域にわたって、水蒸気の吸収スペクトルのピーク位置と線幅を高い SBR で転写しており、新たな分光法としての応用が期待される.

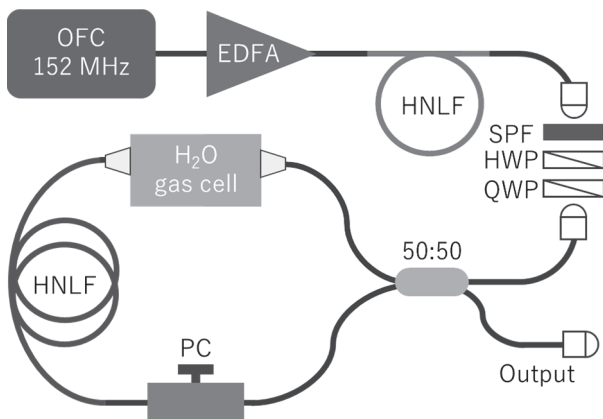


図 1. スペクトルピーク生成光学系

図 1 に本研究で用いたスペクトルピーク生成のための全光学系を示す. 光学系は主に① f_{CEO} , f_{rep} の安定化された 152 MHz 全偏波保持型

Figure-9 Er 添加ファイバーコム, ②Er 添加ファイバー増幅器 (EDFA) と高非線形ファイバー (HNLF) による 1.4 μm 帯広帯域コム生成光学系, ③ガスセル内包型 NOLM を用いた背景低減スペクトルピーク生成光学系にて構成される. 以下に各部の詳細について記述する.

2 152 MHz 全偏波保持型光周波数コム

図 2 に本研究で開発した 152 MHz 全偏波保持型光周波数コムのベースとなるモード同期 Er ファイバー発振器を示す. モード同期方式は全偏波保持で低ノイズ, セルフスタートが可能といった特徴[12]から Figure-9 方式 (NALM 方式) を採用した. ファイバーループの入り口に位置する偏波ビームコンバイナ(PBC)によって二方向に分けられた光は、ループ内を逆方向に伝搬することで異なる非線形位相シフトを受け、その位相差によって合波時の偏光状態が変化する. そこでループ外に偏波ビームスプリッター (PBS) を配置し、波長板にて偏光状態を調整することで、非線形損失が共振器内に生じモード同期が実現される. 分散値を制御しつつファイバーと自由空間光学系の双方を短縮することで繰り返し周波数 152 MHz, スペクトル幅約 50 nm の安定なモード同期を実現した. 励起光源には中心波長 976 nm のファイバー結合型半導体レーザー(LD)を二つ用いた. 合計最大励起出力は 1.6 W であった.

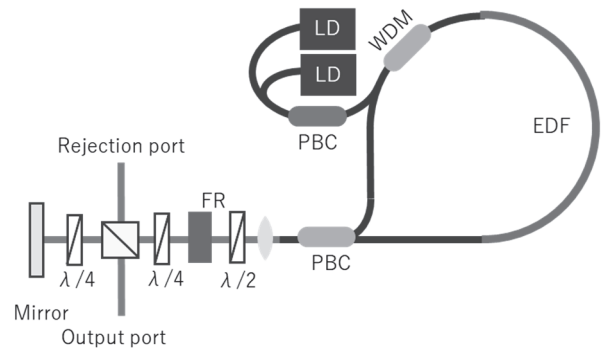


図 2. 152 MHz 全偏波保持型 Figure-9 Er 添加ファイバーレーザー発振器

モード同期レーザーの出力ポートは 2 か所あり、それぞれ 5 mW, 0.3 mW の平均出力であった. このうち 5 mW の出力を分岐して f_{CEO} 及び f_{rep} の安定化に用いた. f_{CEO} 検出系は偏波保持 Er ドープファイバー増幅器 (EDFA), 高非線形ファイバー (HNLF), 導波路型 PPLN 第二高調波発生器, パルスタイミング調整用偏光干渉計にて構成した. 得られた f_{CEO} 及び f_{rep} 信号を, 任

意波形生成器で生成した信号と周波数混合器に入力することでエラー信号を生成し、それぞれ発振器の LD とピエゾ素子にフィードバックすることで双方の位相同期を行った。図 3 (a), (b) に位相同期された f_{CEO} , f_{rep} の RF 信号を示す。双方ともに 1 Hz 以下の線幅に安定化されている。 f_{CEO} 信号は 60 dB もの高い SNR が達成された。図 3 (c), (d) は FFT アナライザにて計測された f_{CEO} 及び f_{rep} の In-loop シングルサイドバンド位相ノイズスペクトルである。それぞれの積算位相ノイズは 72.2 mrad, 0.6 mrad, タイミングジッタは 0.059 fs, 687 fs であった。サーボバンプより推定される f_{CEO} の制御帯域は 200 kHz 程度と非常に広帯域であり、100 mrad 以下の超低ノイズを実現できている。 f_{rep} の制御には本研究ではマイクロ波基準を用いたが、狭線幅 CW レーザーなどの光基準信号を導入することで更なる安定化が可能である。

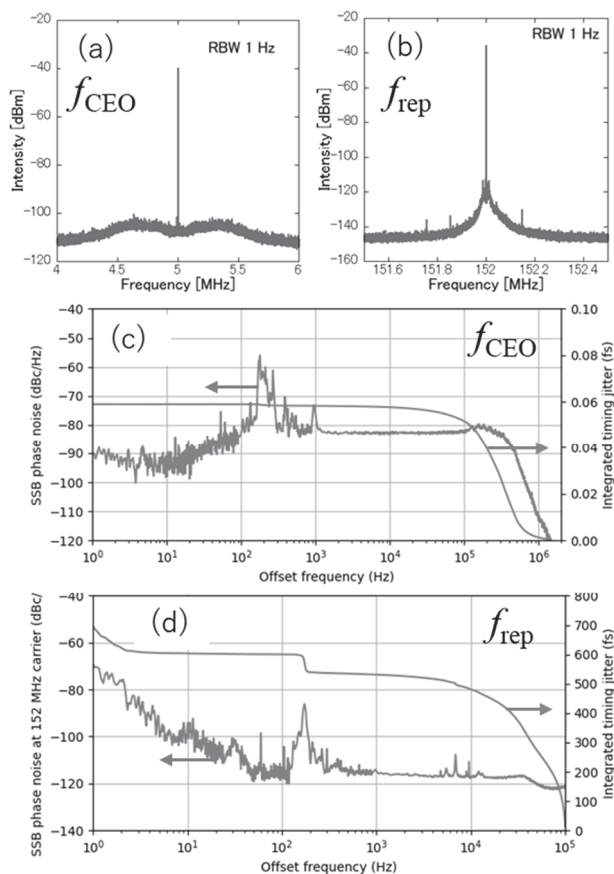


図 3 安定化された(a) f_{CEO} 及び(b) f_{rep} の RF スペクトル, (c), (d) 各信号の In-loop シングルサイドバンド位相ノイズスペクトル

3 1.4 μm 帯広帯域光周波数コム生成

コムから出力された中心波長 1550 nm の超短パルスを EDFA にて増幅し、分散シフト高非線

形ファイバー中の自己位相変調によって 1.4 μm 帯に超短パルスを生成した。EDFA の構成は f_{CEO} 検出系とほぼ同等であり、2 m の偏波保持 EDF を 4 つの LD で対向励起する構成である。増幅の結果、平均出力 360 mW, 圧縮後パルス幅 56 fs を得た。増幅された光は分散シフト高非線形ファイバーに通すことで広帯域化した。このとき目標である 1.4 μm 帯により多くのパワーが集中するように、HNLF の長さをカットバック法にて調整した。図 4 (a) は HNLF の長さを変えたときのスペクトルの変化を示している。ファイバー長 3.5 cm のときスペクトルの広がりには抑えられ、更に EDFA の励起強度を LD 4 つから LD 3 つに調整することで、1.4 μm にピークを持つ最適な出力を得た。図 4 (b) は HNLF 長さ 3.5 cm, 3 LD 励起時のスペクトルの線形表示であり、スペクトルの積分より 1.5 μm 以下の成分のパワーは全体の 30% と計算された。全体の平均出力は 260 mW であった。図 4 (c) はカットオフ波長 1.5 μm の短波長パスフィルタ (SPF) にて切り出されたスペクトルである。1390 nm を中心とした単峰でブロードなスペクトルが得られた。フィルター通過後の平均出力は 70 mW であった。

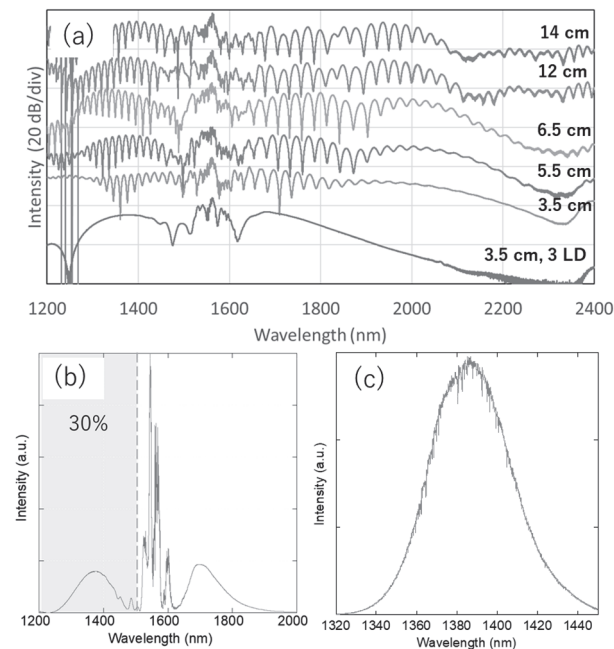


図 4. (a) HNLF の長さを変えた際の出力スペクトル変化, (b) 最適化された出力スペクトル (線形表示), (c) 1500 nm SPF 通過後スペクトル

4 H₂O ガスセル内包 NOLM を用いた 1.4 μm 帯スペクトルピークの生成

図 5 に本研究で用いたピーク生成用ガスセル

内包型 NOLM の構成を示す。実験系は 50:50 カプラー、水蒸気ガスセル、偏波コントローラー、及び高非線形ファイバーからなる。入射した光はカプラーにて時計回り、反時計回りの二方向に分割される。ループ部ではガスセルが高非線形ファイバーに対して非対称に配置されているため、時計回りではスペクトルは単純な吸収ディップを生じるが、反時計回りではスペクトルピーキング現象にてディップがピークへと転じる。カプラーにて再び結合されるとき、両方向の位相差を偏波及び入射パワーにて調節すると、出力ポートからはスペクトルピーク成分のみを抽出できる。このとき背景光を十分に抑制した状態でピークを抽出するためには、時計回りと反時計回りの超短パルス成分のスペクトル変化がおおよそ同じであることが重要であるため、NOLM の対称性が重要である。具体的には HNLF 以外のシングルモードファイバー (SMF) 部分の長さが双方同程度になるように調整して構築を行った。

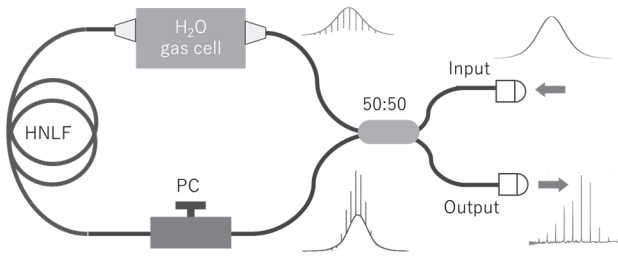


図 5 ピーク抽出用ガスセル内包型 NOLM

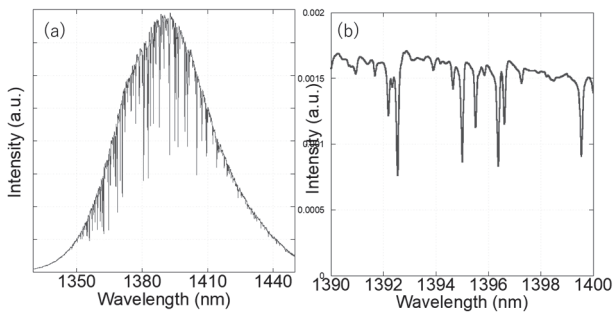


図 6 H₂O ガスセル通過後のスペクトル
(a)100 nm レンジ, (b) 10 nm レンジ

図 6 (a), (b) に H₂O ガスセル通過直後のスペクトルを示す。ガスセルは光路長 80 cm のファイバー結合型マルチパスセルであり、Ar ガスを背景ガスとして水蒸気(H₂O)が飽和水蒸気量混合したガスを密封した。圧力は約一気圧であった。スペクトルから計算された最大吸収率は 54%であった。これは計算値よりも小さいが、スペクトルアナライザの分解能の不足が原因

と考えられる。

図 7 (a)にガスセル内包型 NOLM により生成・抽出されたスペクトルピークを示す。背景成分を抑制した状態で 1350 nm~1420 nm にわたるスペクトルピークの抽出に成功した。得られたスペクトルを HITRAN データベース[13]より計算された H₂O ガスの吸収スペクトル(図 7. (b)) と比較すると、各吸収ピークに対応した波長位置にスペクトルピークが生成されていることが分かる。吸収スペクトルと比べると波長 1400 nm 以上の成分が低くなっていることがわかるが、これは NOLM への入射スペクトルの形状 (図 4. (c)) が反映されているためである。

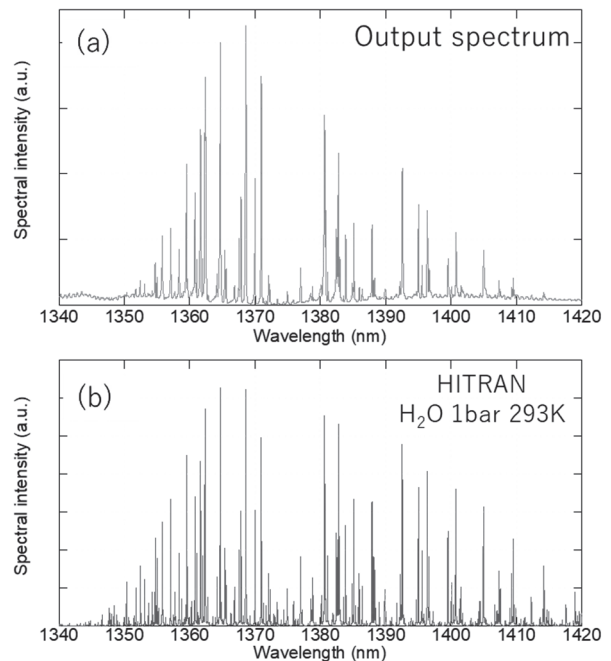


図 7. (a)NOLM からの出カスペクトル
(b) HITRAN データベースより計算された水蒸気の吸収スペクトル

図 8 (a), (b)に 1368.6 nm の一本の吸収ディップ及びスペクトルピークの拡大図を示す。このとき使用したスペクトルアナライザの分解能は 5 pm であった。ディップ、ピーク双方の線幅は 50 pm 程度であり、これは計算から予測される線幅より広いものであった。ピークと吸収ディップが同様の線幅を持っていることより、線幅が広い原因は NOLM の非線形光学効果ではなく、吸収線幅自体が圧力などで広がっていたと考えられる。図 8 (c)は生成されたピークの 1365 nm 付近の成分を対数プロットしたスペクトルである。SBR は最大 30 dB であり、NOLM の高い選択性によって背景光を十分

に抑制することに成功した。

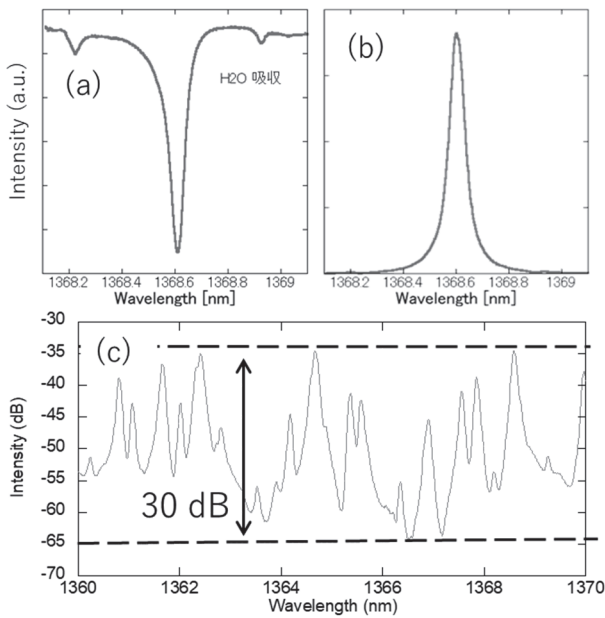


図 8 (a)吸収スペクトル, (b)スペクトルピークの拡大図, (c) スペクトルピーク列の対数表示

5 まとめ

本研究では新たに開発した高繰り返し・低ノイズファイバーコムをベースとし、ガスセル内包型 NOLM を用いたスペクトルピーク抽出法を用いることで、 $1.4 \mu\text{m}$ 帯の水蒸気吸収スペクトルを転写したスペクトルピーク列の生成に成功した。ピークそれぞれの線幅は 50 pm , SBR は最大 30 dB が得られた。今後は得られたスペクトルピークと光周波数コムの特性を生かした精密分光計測への応用を行う予定である。

6 謝辞

本研究は、JST CREST JPMJCR2104 の支援を受けて行われた。

7 参考文献

- [1] T. Udem, R. Holzwarth, and T. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature* **416**, 233–237 (2002).
- [2] S. A. Diddams, "The evolving optical frequency comb [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, B51–B62 (2010).
- [3] T. Fortier, E. Baumann, "20 years of developments in optical frequency comb technology and applications," *Commun Phys* **2**, 153 (2019).
- [4] N. Nishizawa and M. Yamanaka, "Periodical spectral peaking on optical pulses," *Optica* **7**, 1089 (2020).
- [5] N. Nishizawa and M. Yamanaka, "Characteristics of spectral peaking in optical fibers," *Opt. Express* **29**, 42876 (2021).
- [6] N. Nishizawa, S. Kitajima, and Y. Sakakibara, "Spectral peaking in an ultrashort-pulse fiber laser oscillator with a molecular gas cell," *Opt. Lett.* **47**, 2422–2425 (2022).
- [7] N. Nishizawa, S. Kobata, and S. Kitajima, "Controllable, intense spectral peaking with a spectral filter and optical fiber," *Opt. Lett.* **47**, 6165 (2022).
- [8] D. Okazaki, W. Song, I. Morichika, and S. Ashihara, "Mode-locked laser oscillation with spectral peaks at molecular rovibrational transition lines," *Opt. Lett.* **47**, 6077–6080 (2022).
- [9] K. Jung, S. Kitajima, and N. Nishizawa, "Frequency modes filtering of spectral peaks in optical frequency combs through molecular gas absorption and nonlinear polarization rotation," *Opt. Express* **31**, 27935–27947 (2023).
- [10] 坂田 直規, Jung Kwangyun, 北島 将太郎, 西澤 典彦, "ファイバ型非線形偏光干渉ループミラーを用いたスペクトルピークの抽出," 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-A501-4 (2023).
- [11] N. Nishizawa, K. Jung, and S. Kitajima, "Background-reduced spectral peak generation using a nonlinear loop mirror with a gas cell," *Opt. Lett.* **48**, 4869–4872 (2023).
- [12] W. Hänsel, H. Hoogland, M. Giunta, S. Schmid, T. Steinmetz, R. Doubek, P. Mayer, S. Dobner, C. Cleff, M. Fischer, and R. Holzwarth, "All Polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation," *Appl. Phys. B* **123**, 41 (2017).
- [13] L.S. Rothman, I.E. Gordon, A. Barbe, D. Chris Benner, *et. al.*, "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **110**, 533–572 (2009).