

## 論文の内容の要旨

論文題目 Multi-GHz光周波数コムによる精密分光研究

氏名 遠藤 護

### 【研究背景】

超短パルスレーザーであるフェムト秒モード同期レーザーの光スペクトルは、レーザーの繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  間隔で多数の縦モードが並んだ櫛状の構造をもつ。その  $n$  番目の縦モードの光周波数  $f_n$  は、 $f_n = f_0 + nf_{\text{rep}}$  というようにオフセット周波数  $f_0$  (または  $f_{\text{CEO}}$ ) と繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$  というマイクロ波領域の周波数と、モードナンバー  $n$  で表現できる。換言すると、直接測定が困難な光周波数領域と、電氣的測定技術が成熟しているマイクロ波領域という二つの周波数領域が、モード同期レーザーによってリンクしていると言える。したがって、二つの自由度 (たとえば  $f_0$  と  $f_{\text{rep}}$ ) によってレーザーの光周波数のすべてを操ることができ、そのように制御されたモード同期レーザーを光周波数コムと呼ぶ。そのスペクトル構造から「互いに位同期した多数の cw レーザーの集合」と表現され、光時計、絶対距離測定などの計量標準分野での応用[1-3]にとどまらず、呼吸診断などの医療・環境応用[4]、また本論文でも触れる天文分野への応用[5]など、その応用は多岐にわたる。しかし、一般的な光周波数コムのモード間隔は GHz 以下と狭く、典型的な分光器ではその櫛構造を見ることはできない。もしコム分解ができれば「多数の cw レーザー」としての性質を存分に発揮することができ、超精密分光や任意波形生成、レーザー冷却への応用など、さらなる可能性をもつに違いない。そこで本論文ではコム分解分光応用に向けた光源として、multi-GHz のモード間隔 (4 GHz と 15 GHz) を持つ光周波数コムを開発した。また分光器の高分解能化も図り、周波数分解能 600 MHz (波長換算で 2.2 pm) という multi-pass 分光器も開発した。次にコム分解分光応用の一つとして、line-by-line 任意光パルス生成 (line-by-line OAWG) [6]に成功した。Multi-GHz 光周波数コムの応用可能性はコム分解分光に限らない。本論文の最後にはシリカファイバー内の音響フォノンを multi-GHz の超短パルスを用いて励起する実験を行った。キャリア周波数、パルス幅、繰り返し周波数をコヒーレントに制御し音響フォノンを励起した本研究は新たな励起法として有用であろう。以下では各実験成果を述べる。

【研究成果】

• Multi-GHz 光周波数コムと高分解能分光器の開発

一般的な光周波数コムのモード間隔( $f_{rep}$ )は 1 GHz 以下であり、これを分解するためには、少なくとも 30 cm の大きさの分光素子が必要となる。このように大型の素子を用意することは現実的ではないため、コム分解応用を実現するためにはモード間隔の広いコムを開発することが切望される。また繰り返し周波数の高いコムの利点は他にもある。各縦モードあたりの強度が強くなるため、測定の SNR が向上し、また励起光源としても十分な強度をもつようになる。さらに、モード間隔が分子や原子の室温におけるドップラー広がり(< 3 GHz)よりも広い場合、特に飽和吸収分光などが容易になるという利点もある。従って、繰り返し周波数の目標値のひとつとしては 4 GHz (据え置き型の光スペクトラムアナライザでかろうじて縦モード分解が可能)があり、ふたつめとしてはその 3 倍の 12 GHz(99%以上のビジビリティでモード分解できる)がある。



図 1 高分解能分光器によってモード分解された 4 GHz 光周波

はじめに開発したのは 4 GHz の光周波数コムである。これは、共振器長の小さい繰り返し周波数 4 GHz のカーレンズモード同期 Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックフェムト秒レーザーを独自に開発し、その繰り返し周波数を当研究室で保有している Yb ファイバー光周波数コムに対して位相同期した。開発したレーザーはこれまでに私が開発した Yb:KYW レーザー[8]や Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックレーザー[9]で使用したレーザー媒質を、より非線形屈折率の高い Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラミックに変更したものである。その縦モードを分解するために実用上の最高周波数分解能 600 MHz の分光器を開発した。これはキャノン製の透過型グレーティングを使用したマルチパス方式の分光器である。一

回の回折では必要な分解能が得られないが、今回のように 7 回回折させることで分解能 600 MHz を得ることができた。これにより 4 GHz の光周波数コムの縦モードを分解することに成功した[11] (図 1)。

次に一般的な分光器でも縦モードを分解できるようモード間隔 12 GHz 以上の光周波数コムを目指した(図 2)。繰り返し周波数が 10 GHz 以上のカーレンズ

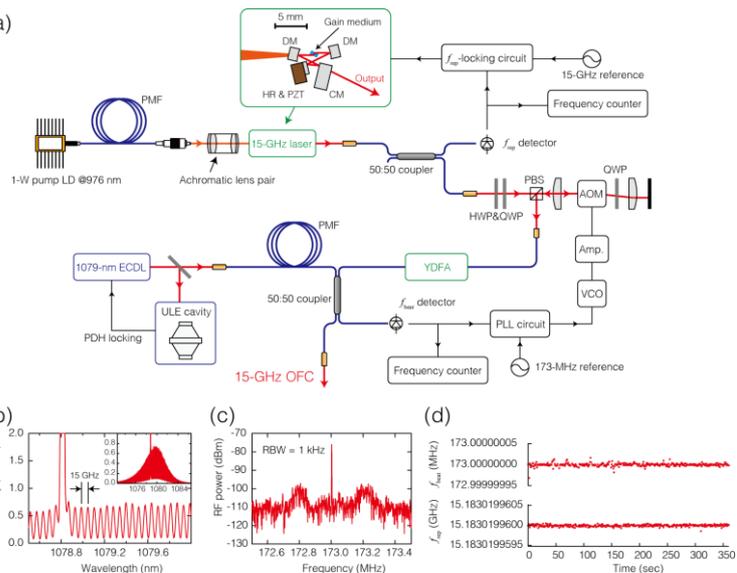


図 2 15 GHz 光周波数コムの(a)セットアップと (b-d)位相同期時の特性

モード同期レーザーの実現が困難であるのは、ピーク強度が小さいため非線形光学効果であるカーレンズ効果が起こりにくいからである。そこで、曲率半径が 5 mm の球面ミラーを用いた共振器を設計した。このミラーの採用により、ゲイン媒質内でのビームウェスト径が小さくなりカーレンズ効果が増強された。その結果、繰り返し周波数 15 GHz のカーレンズモード同期フェムト秒レーザーの開発に成功した。このレーザーの繰り返し周波数を RF 参照信号源に位相同期し、縦モードの一つを超安定 cw レーザー（波長 1076 nm、周波数ドリフト = 160 mHz/s）と位相同期することで、15 GHz の光周波数コムの実現に成功した[10]。

- Line-by-line 任意波形光パルス生成

フェムト秒レーザーのスペクトルに空間光変調器(SLM)を用いて強度・位相マスクを施して再合成し任意波形の光パルスを得る手法は一般的である。しかし、レーザーの縦モード一つ一つに独立したマスクを施すことができれば、極めて高い自由度での任意波形生成が実現できる。具体的な利点の一つは Duty 比の制限がなくなることである。従来の手法では、モードごとではなく複数の縦モード（例えば  $m$  本）を含むスペクトル領域ごとのマスクとなるため、Duty 比は  $1/m$  で制限されてしまう。それに対してモードごとにマスクをすることができれば、時間領域をすべて埋め尽くすようなパルス波形をも実現できる。コヒーレント制御、レーザーレーダー、繰り返し周波数の通倍、動作部分のないディレイラインなどへの応用が期待されている。しかし、コム分解が困難であることから、この研究は限られたグループでしか実現できていなかった。本論文では先に紹介した高繰り返しレーザーを用いた line-by-line OAWG を実現し、繰り返し周波数の通倍や正弦波などに成功した。また、隣接縦モード間の位相からパルス波形を再構築することにも成功した。

- シリカファイバー中の GHz 音響フォノン励起

シリカファイバーの音響フォノンの周波数は波長 1080 nm 付近で 15.6 GHz であり、しきい値以上の単色励起光を入射すると、励起光より周波数が 15.6 GHz 低い後方散乱ストークス光が生じる。これは誘導ブリルアン散乱(SBS)として知られている。一般的には SBS は光通信の分野などで忌み嫌われる現象であるが、これを積極的に利用することで光アイソレーター、fast-slow light、音波レーザーなどへの応用が期待されている。そこでレーザーの繰り返し周波数をフォノンの周波数と合わせることで

SBS の効率的な励起・抑制を試みた。キャリ

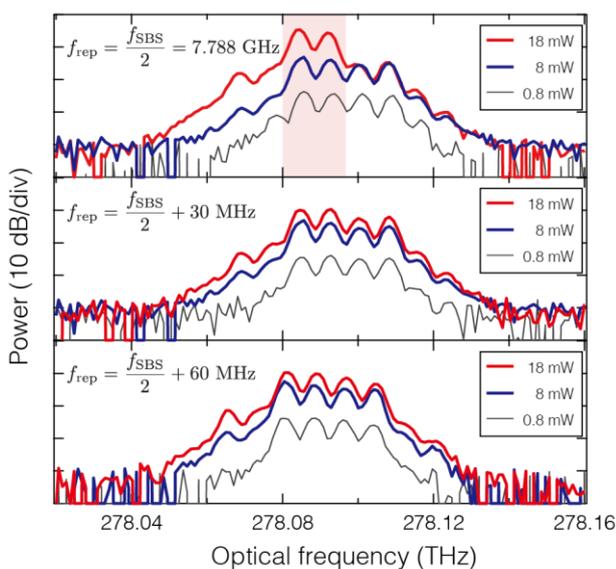


図 3 後方散乱スペクトル

ア周波数 (278 THz) 繰り返し周波数(15.6 GHz)で音響フォノンを直接励起するというこれまでになかった励起方法である。実際の実験では繰り返し周波数を 15.6 GHz の半分である 7.85 GHz 付近に設定し、二倍波で励起した。図 3 のように繰り返し周波数を音響フォノンの周波数と合わせた時と、フォノンの線幅である 20 MHz 以上ずらしたときで、後方散乱スペクトルのストークス成分に大きな違いが見られた。これは繰り返し周波数が音響フォノン励起にとって重要な励起パラメータであるということを示す結果である。

#### 【まとめ】

本研究では光周波数コムの新たな可能性を見いだすべく、コム分解分光という分野に着目した。そもそも光周波数コムモード間隔が 1 GHz 以下と狭く、コム分解が困難であったという課題に対して、私の研究では multi-GHz の光周波数コムと sub-GHz 分解能分光器を開発することで解決した。コム分解分光の一例として縦モードの一つ一つに独立した強度・位相マスクを施す line-by-line 任意波形生成の実現とパルス波形測定に成功した。また、GHz という繰り返し周波数をシリカファイバーの音響フォノンの周波数に合わせて、音響フォノンを効率的に励起することも成功した。

#### 【参考文献】

1. M. Takamoto, *et al.*, *Nature* 435, 321–4 (2005).
2. B. J. Bloom, *et al.*, *Nature* 506, 71–75 (2014).
3. S. van den Berg, *et al.*, *Sci. Rep.* 5, 14661 (2015).
4. M. J. Thorpe, *et al.*, *Opt. Express* 16, 2387–97 (2008).
5. T. Wilken, *et al.*, *Nature* 485, 611–4 (2012).
6. S. T. Cundiff and A. M. Weiner, *Nat. Photonics* 4, 760–766 (2010).
7. P. Kockaert, *et al.*, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 12, 187–189 (2000).
8. M. Endo, A. Ozawa and Y. Kobayashi, *Opt. Express* 20, 3–4 (2012).
9. M. Endo, A. Ozawa and Y. Kobayashi, *Opt. Lett.* 38, 4502–5 (2013).
10. M. Endo, I. Ito and Y. Kobayashi, *Opt. Express* 23, 1276 (2015).
11. M. Endo, *et al.*, *Proc. SPIE* 91477, (2014)