

人工衛星搭載に向けた高安定光周波数コムの開発

武者研究室 松阪 佳奈

1. はじめに

光周波数コム[1]とは周波数軸上で等間隔に縦モードが並んだコヒーレントな光源であり、分光や測距などに応用されている。分光においては、1台の光周波数コムを周波数基準として利用する方法や光周波数コムを2台用いて行うデュアルコム分光法がある。中でも周波数基準に関しては、光周波数コムを周波数コンバーターとして利用し、光領域の持つ高い周波数安定度をマイクロ波に移乗させ、より高安定なマイクロ波基準を作ることができる。その応用例として、宇宙に打ち上げ、GPSの精度を向上させることなどがあげられる。このような宇宙での応用を実現させるには、長期安定動作を可能にすることや周波数の長期安定度を高くすることが求められる。

そこで、本研究ではこれまで開発してきた非線形偏波回転を用いた光周波数コムに代わり、長期安定動作を可能にするため、発振器であるモード同期レーザーを偏波保持(PM)ファイバを用いた非線形ファイバリングミラーで作製し、周波数の長期安定度を高くするためにヨウ素の分子の吸収線を制御の基準として利用する光周波数コムを開発を目的とする。

2. 原理

光周波数コムはモード同期レーザーを発振器として、周波数安定化の制御を行った光である。モード同期レーザーとは、共振器内の多数の縦モードの位相を揃え固定した状態で発振させるレーザーであり、時間軸上で非常に短いパルス幅を持つパルス列の形成と定期的な発振を実現できるという特徴がある。モード同期を行う方法として受動モード同期があり、非線形偏波回転(NPR)[2]や非線形増幅リングミラー(NALM)[3]を用いて強度依存の損失

を与えることにより実現できる。モード同期レーザーからは図1のように、周波数軸上で等間隔に縦モードが並んだ光が出力される。その各縦モードの周波数が時間的に揺らがないように制御を行うことにより、光周波数コムは実現される。

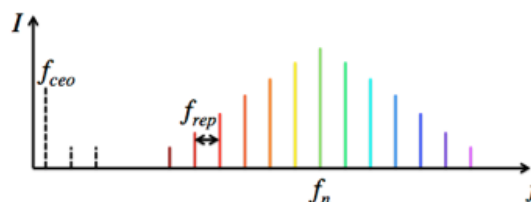


図1. 光周波数コム概念図

光周波数コムはn番目の縦モード周波数 f_n は、オフセット周波数 f_{cco} と繰り返し周波数 f_{rep} を用いて、次のように表せる。

$$f_n = f_{cco} + n \cdot f_{rep} \quad \dots (1)$$

f_{cco} と f_{rep} それぞれに対して基準を用意し、その基準に同期するよう周波数安定化を施すことにより、各縦モードの周波数を時間的に安定にすることができる。 f_{cco} はモード同期レーザーの励起強度、 f_{rep} は共振器長を制御することにより周波数を安定化することができる。制御にはレーザーの周波数安定化で一般的に用いられる負帰還制御(ネガティブフィードバック制御)を用いることが多い。負帰還制御は系を何度も周回することで目標値へ自動的に追従することが可能であり、利得(Gain)を1倍以上にできるという利点がある。

3. 実験概要と結果

3.1 非線形偏波回転の光周波数コムを開発

まず、修士課程前半に行っていたNPRを用いた光周波数コム[4]の実験結果を示す。実験系を図2に示す。モード同期レーザーは、Er添加ファイバを利得媒質としたリング型共振器で構成されており、ポラライザーで選択される光のみ共振させ、パ

ルスを発生させている。その繰り返し周波数は 50.4 MHz、光スペクトルは図 3 のようになっており、スペクトル幅は 70 nm となった。このモード同期レーザーを共振器として使用し、制御を行うことで光周波数コムを実現させた。

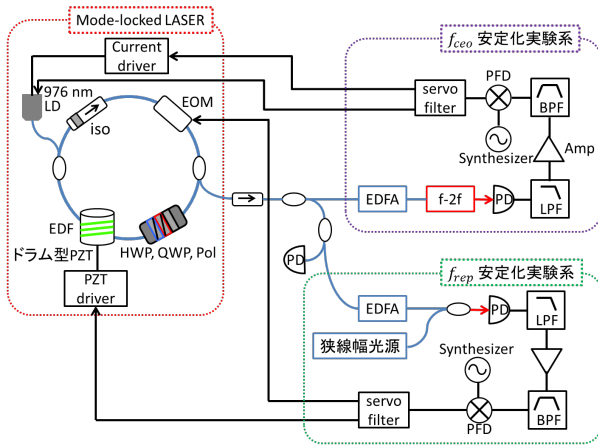


図 2. NPR を用いた光周波数コムの実験系

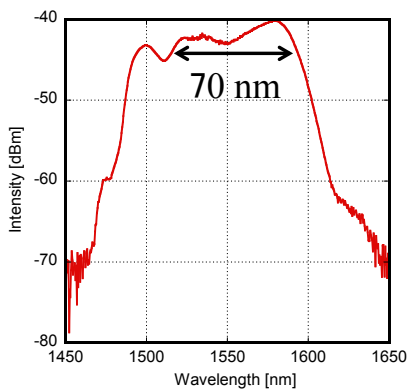


図 3. NPR を用いたモード同期レーザーの光スペクトル

まず、 f_{ceo} の周波数安定化を行った。 f_{ceo} は高非線形ファイバ(HNLF)でスペクトルを拡大し、基本波と 2 倍波のビート信号を観測する f-2f 干渉計によって得られる。実験系を図 4 に示す。その f-2f 干渉計の再構築を行い、信号が 30 dB 以上安定して得られるようにした。その後、得られた f_{ceo} に対し、Rb 原子時計に同期したマイクロ波を基準として、LD ドライバーの変調端子と LD チップへの直接注入を併用し、フィードバック制御を行った。その結果、図 5 のように狭窄化された f_{ceo} のスペクトルが得られ、制御帯域 230 kHz で SN 比 30 dB 以上の信号

を得ることができた。このときの f_{ceo} の周波数安定度をアラン分散で評価した結果は図 6 のようになり、光領域において 1 秒で 5.1×10^{-17} という周波数安定度になった。

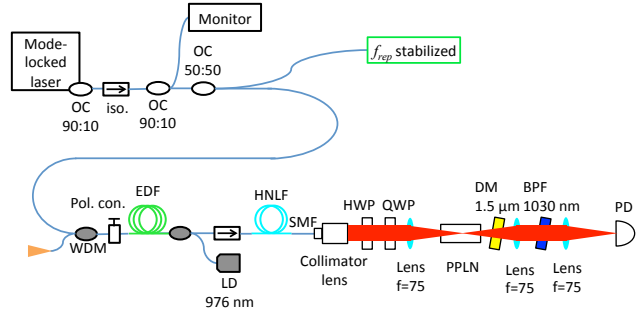


図 4. f-2f 干渉計の実験系

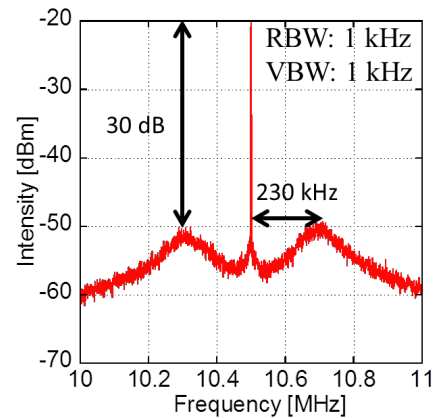


図 5. 位相同期時の f_{ceo} ビートスペクトル

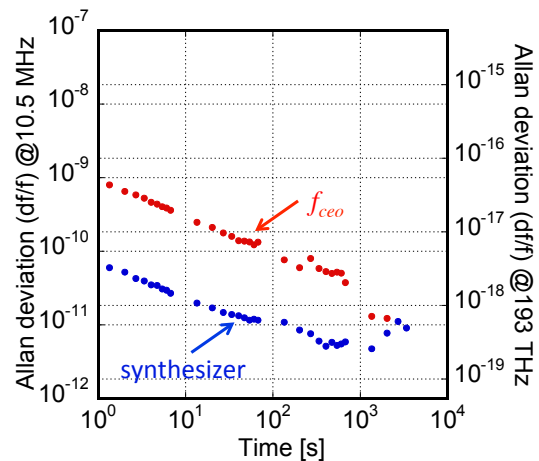


図 6. 位相同期時の f_{ceo} ビートのアラン分散

次に、 f_{rep} の周波数安定化を行った。 f_{rep} は光領域の周波数基準である共振器で安定化させた 1.5 μm の狭線幅光源を基準として用いて、狭線幅光源と光

周波数コム縦モードの1つのビート信号を取り、その周波数 f_{beat} をRb原子時計に同期したマイクロ波と位相同期させることで周波数安定化を行った。具体的には、ファイバの一部を巻き付けた円筒型の圧電素子(PZT)とインライン型の電気光学変調子(EOM)を併用し、フィードバック制御を行った。その結果、図7のように狭窄化された f_{beat} のスペクトルが得られた。このとき、制御帯域は690 kHzとなったが、SN比は17 dBと低くなった。これは図8のように、狭線幅光源が周波数変調を受け、安定度が悪化し、光周波数コムと狭線幅光源とのビートが太くなったからだと考えられる。そのため、狭窄化された f_{beat} のスペクトルのSN比を向上させるには、狭線幅光源に混入する電気的な雑音を取り除く必要がある。

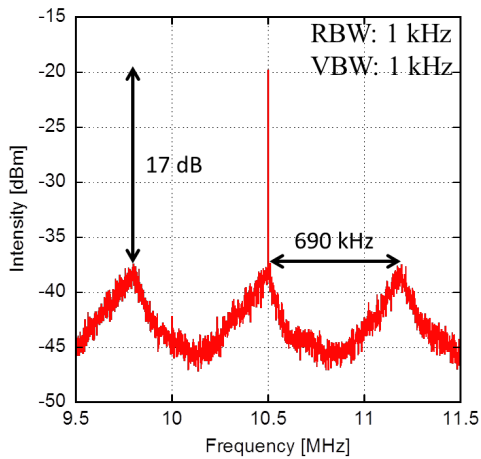


図7. 位相同期時の f_{beat} スペクトル

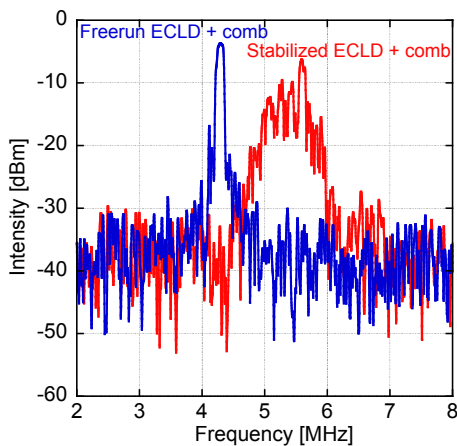


図8. 狭線幅光源とモード同期レーザーのビート信号

3.2 非線形ファイバループミラーの光周波数コムの開発

宇宙での応用を考えた際、長期安定動作と長期の周波数安定度向上が必要である。長期安定動作を可能にするためには外乱に強い事が重要である。NPRは偏光を利用するため、温度変化や振動といった外乱に敏感であった。そこで、図9のような偏光を維持するPMファイバを用いた8字型共振器によるモード同期レーザー[5]を作製した。8字型共振器はNALMを利用しており、そのミラーの透過率が強度に依存することとアイソレータを組み合わせることで強度依存の損失を生み出し、モード同期を行っている。ミラーの透過率を変化させるため、EDFの配置の非対称性による光路差と、図9において $\Delta\phi$ と表されている非相反位相シフタ(NRPS)[6]を組み合わせることにより、図9の左側のループにおいて右回りと左回りで異なる位相シフトを与えている。作製した結果、スペクトル幅は図10に示すように約11 nm、繰り返し周波数は約45 MHzのモード同期レーザーとなった。出力は280.0 mAで励起した際に、中心周波数である1565 nmでの換算で1.432 mWとなった。このモード同期レーザーを発振器として使用し、制御を行い、光周波数コムを実現しようとした。これまでのNPRを用いた光周波数コムの実験系との相違点として、 f_{rep} 安定化実験系において、EDFA後にHNLFを挿入し、1 μm のヨウ素安定化レーザーとのビート信号を取得できるようにしていること、銅板を介したペルチェによる温度制御と小型PZTを併用し、フィードバック制御を行っている点が挙げられる。

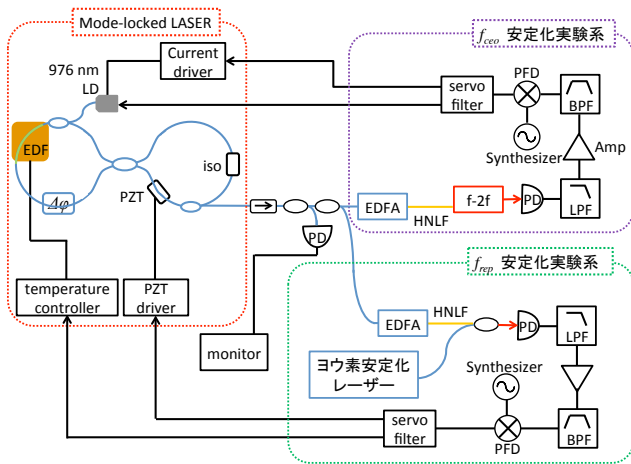


図 9. 8 字型共振器を用いた光周波数コムの実験系

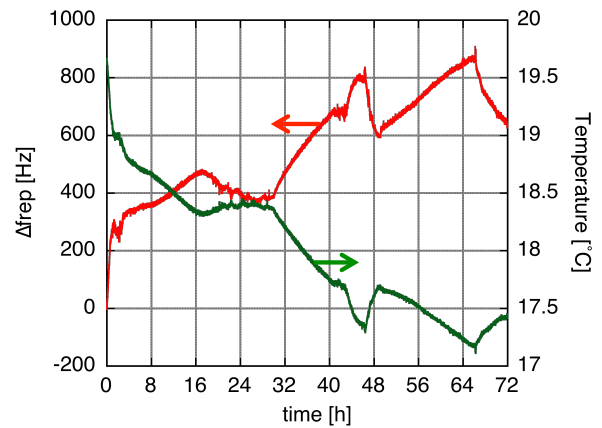


図 11. モード同期レーザーの繰り返し周波数の変化

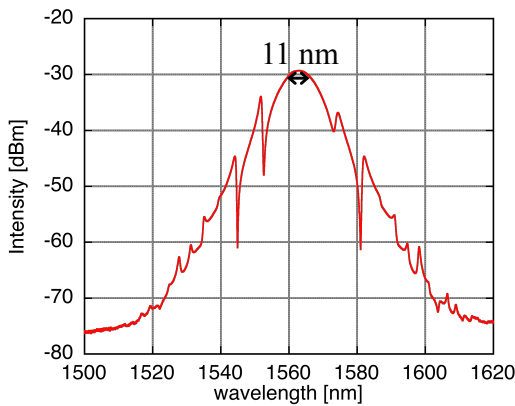


図 10. 8 字型共振器のモード同期レーザーの光スペクトル

まず、このモード同期レーザーの長期安定動作について検証した。モード同期レーザーを箱で覆うことなく、温度変化や振動などの外乱に晒した状態で連続動作させた。その結果、図 11 で f_{rep} が途切れることなく時間変化していることから、測定を終了した 72 時間経過まで 1 度もモード同期が外れることなく動作したことがわかった。このことから、長期安定動作可能であると判断した。また、図 11 より、 f_{rep} の周波数の時間変化は温度変化と強い関係があることがわかった。

次に、 f_{ceo} の周波数安定化を行った。はじめに、EDFA によるパルス波の高出力化を行った。これは HNLf を通過することで得られるスーパーコンテニューム光(SC 光)のスペクトルが広帯域に広がるようにするためである。このとき得られた最高出力は中心波長である 1565 nm での換算で 105 mW であった。この EDFA を通過後の光を自己相関計に入射し、自己相関波形を得た。その結果、自己相関波形は図 12 のようになり、パルス幅は sech^2 型フィッティングで 343 fs と求められた。その後、HNLf、 $f\text{-}2f$ 干渉計に入射し、SN 比 30 dB 以上の f_{ceo} 信号を得た。このときのスペクトルの拡大図は図 13 のようになり、スペクトル幅は 180 kHz となり、NPR と比較して太くなった。そして、NPR と同様にフィードバック制御を行ったところ、図 14 のように制御帯域は約 100 kHz となった。しかし、図 15 からわかるように、狭窄化された f_{ceo} 信号を得ることができなかった。これは f_{ceo} 信号の線幅が太いことが原因だと考えられる。この線幅は発振器の性能によって決定されるため、発振器であるモード同期レーザーの見直しが必要であることがわかった。

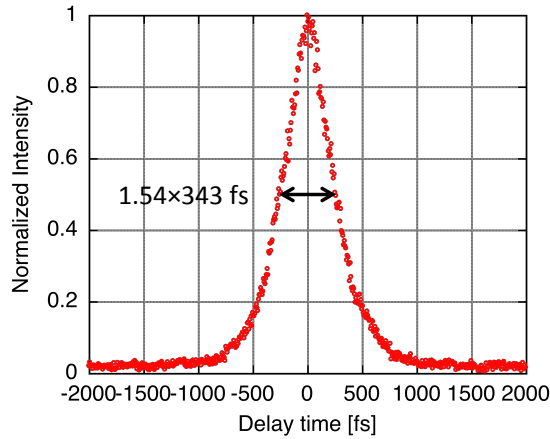


図 12. EDFA 後の自己相関波形

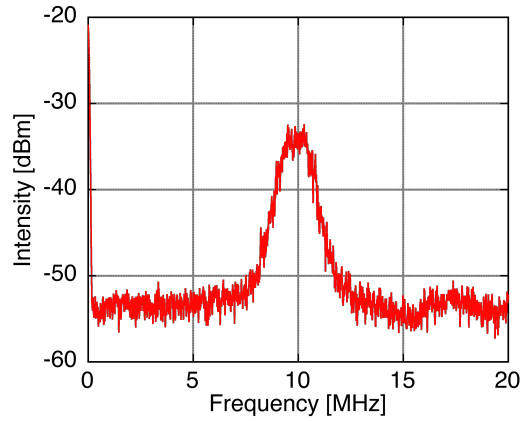


図 15. 位相同期時の f_{ceo} ビートスペクトル

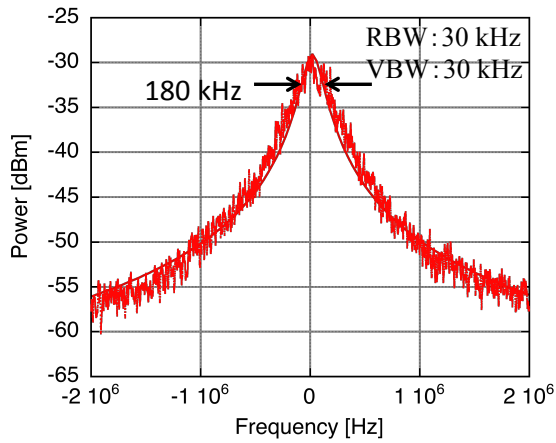


図 13. f_{ceo} ビートスペクトルの拡大図

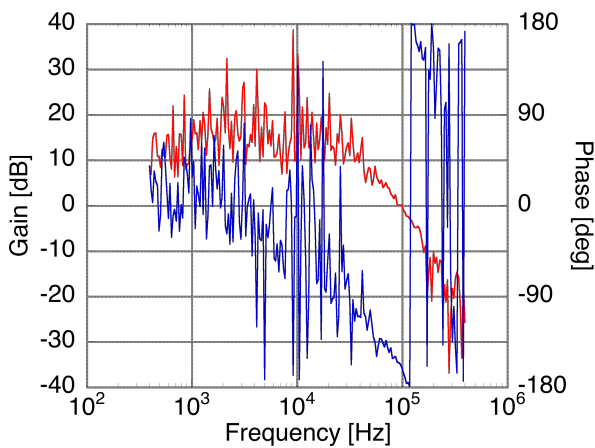


図 14. 位相同期時のオープンループ特性

続いて、 f_{rep} の周波数安定化に向けて、図 16 のような実験系を用いて、光周波数コム(SC光)と単一モードの 1030 nm Fiber DFB レーザーとのビート信号を得た。今回はヨウ素安定化レーザーに代わって、単一モードの 1030 nm Fiber DFB レーザーを用いた。図 16 において、光周波数コム(SC光)の光路上に SPF と BPF を挿入することにより、目的である 1030 nm 以外の光を取り除き、雑音フロアが上がらないようにし、ビート信号の SN 比が向上するようにした。その結果、図 17 のような SN 比 15 dB の信号を得た。このように SN 比が低くなった要因として、図 18 からわかるように、Fiber DFB レーザーと比較して光周波数コム(SC光)の出力が弱いことが考えられる。そのため、光周波数コム(SC光)の高出力化が必要であることがわかった。

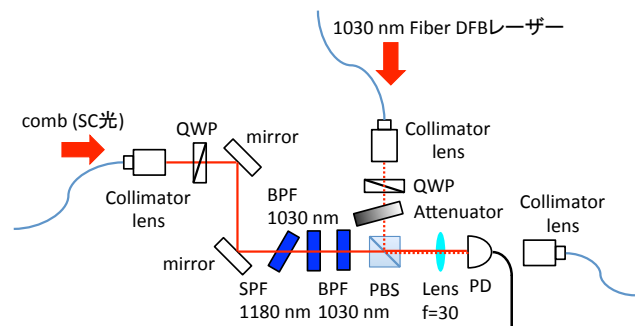


図 16. SC 光と Fiber DFB レーザーのビート信号取得の実験系

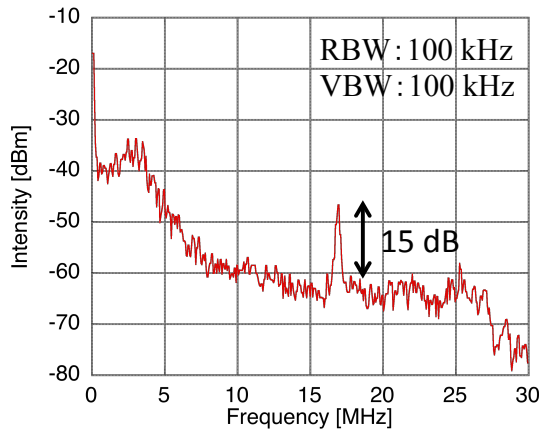


図 17. SC 光と Fiber DFB レーザーのビートスペクトル

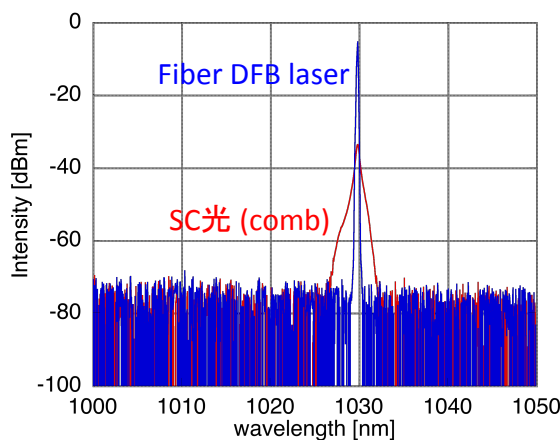


図 18. SC 光と Fiber DFB レーザーのビートの光スペクトル

4. まとめ

はじめに、非線形偏波回転を用いたモード同期レーザーを発振器とした光周波数コム f_{ceo} と f_{rep} それぞれの周波数安定化を行った。その結果、 f_{ceo} の制御帯域は 230 kHz、 f_{rep} の制御帯域は 690 kHz となったが、 f_{rep} は十分な SN 比を持った信号が得られなかった。この SN 比を向上させ周波数安定度を向上させるには、狭線幅光源の制御系を見直し、制御ループに混入する電氣的な雑音を取り除く必要がある。

次に、宇宙での応用を考えた際、長期安定動作と長期の周波数安定度向上が課題となったので、長期安定動作可能とするため、PM ファイバを用いた 8 字型共振器によるモード同期レーザーを作製した。その結果、1565 nm 中心に約 11 nm 広がった、約 45 MHz の繰り返し周波数を持つパルスを得ることができた。これを発振器とし、 f_{ceo} の周波数安定化を行った。その結果、位相同期を行っていない状態で SN 比 30 dB 以上の f_{ceo} が得られたものの、並列制御時は制御帯域約 100 kHz において、狭窄化して得られる f_{ceo} 信号のピークやサイドバンドを観測することはできなかった。これは f_{ceo} 信号の線幅が太いことが原因と考えられるので、発振器であるモード同期レーザーの見直しが必要である。また、 f_{rep} の周波数安定化に向けて、光周波数コム f_{ceo} と単一モードの 1030 nm Fiber DFB レーザーのビート信号を得たが、SN 比が 15 dB と十分な値ではなかったため、SN 比向上に向け、光周波数コム f_{ceo} の高出力化が必要であることがわかった。

参考文献

- [1] S. A. Diddams, et al. Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5102-5105
- [2] L. E. Nelson, et al. Appl. Phys. B 65 (1997): 277-294
- [3] M. E. Fermann, et al. Opt. Lett. 15 (1990): 752-754
- [4] H. Inaba, et al. Optics Express 14.12 (2006): 5223-5231
- [5] E. Baumann, et al. Optics letters 34.5 (2009): 638-640
- [6] H. Lin, et al. J. Lightwave Technol. (1994): 1121-1128