

1.5 μm 帯光周波数コムを用いたデュアルコム分光システムの開発

武者研究室 齊藤 洋平

1. はじめに

分光とは原子・分子がそれぞれの構造に応じた固有の吸収スペクトルを持つことを利用して、未知の試料の同定や解析、さらには濃度測定などを行うことが可能な技術である。その分光を行うに当たり、注目されている手法として 2 台の光周波数コムを用いたデュアルコム分光法[1]がある。この方法は 2 台の繰り返し周波数 f_{rep} がわずかに Δf_{rep} ずれた光周波数コムを用いることで、ミラー掃引の必要ないフーリエ分光を行う方法であり、機械的掃引を排することによって従来のフーリエ分光法以上の測定速度を実現できるだけでなく、高分解能かつ小型なセットアップが実現可能であり、従来以上の精密分光測定やリアルタイム測定、そして従来では不可能なレベルの高速な現象の観測などが可能になることが期待されている。しかし、その分光範囲は未だ FT-IR に及ばず[2]、より有用な分光対象が存在する赤外領域は光源の不足が問題となっている。

我々は赤外分光システムの研究のため、まず安定動作が可能な Er 添加ファイバにより構成された 2 台の近赤外 1.5 μm 帯光周波数コムの開発を行ってきた。まずは、このデュアルコムにより分光を行い、その結果を評価することを目標としている。

2. 原理

光周波数コムとは周波数軸上に等間隔に並んだ縦モードを持ちその n 番目のモード周波数 f_n はその間隔 f_{rep} と周波数軸上のオフセット成分である f_{ceo} を用いて次のように表せる。

$$f_n = f_{ceo} + n f_{rep} \dots (1)$$

通常の精密分光は、波長可変の光源を用意す

ることにより行われるが、光周波数コムはその広いスペクトルにより一度の測定で、多くの情報を取得することが可能である。しかし、光の周波数は直接検出不可能であるため、その周波数決定には測定光と基準光とのビートをとってダウンコンバートすることで、マイクロ波で観測可能にする必要がある。また、光周波数コムスペクトルの広さは 1 THz 以上になるため、通常のビート検出でその全てを一度に測定することは通常のフォトディテクターでは不可能であり、その利点を十分に引き出すことができなかった。そこで 2 台の f_{rep} が Δf_{rep} だけ異なる光周波数コム基準光としてビートを検出し、 Δf_{rep} 間隔のビートとして光周波数の情報を観測することで f_{rep} を圧縮し、全ての情報をワンショットで観測可能にする方法がデュアルコム分光法である (図 1)。このようにして一度にすべての情報を取得することで、超高速分光を可能にしておき、その測定時間は Δf_{rep} の逆数で決定される。周波数軸上ではこのような解釈ができるが、時間軸上では、フーリエ分光法でミラーを掃引することにより 2 つの経路の光の遅延を変化させていた手法を、2 台の時間上のパルス間隔 $\tau = f_{rep}^{-1}$ がわずかに異なる光周波数コムを干渉させることにより時間的遅延を掃引しており、これにより得た自己相関関数をフーリエ変換することでそのスペクトルを取得していることになる。

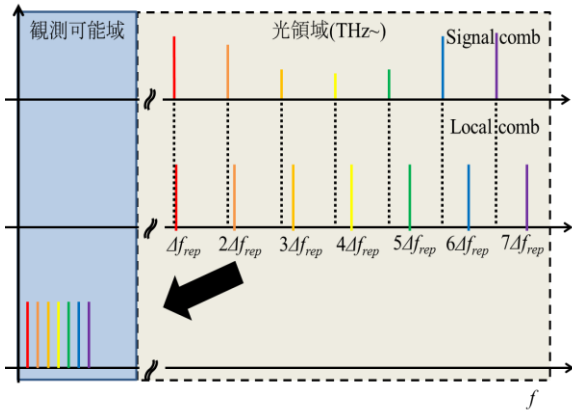


図1 デュアルコム分光の原理図

測定速度において利点を持つ反面、その測定範囲 f_{dyn} には次の式で決まる制約が存在する。

$$f_{dyn} = \frac{f_{rep}^2}{2\Delta f_{rep}} \quad \dots (2)$$

例えば $f_{rep}=250$ Hz で $f_{rep}=54$ MHzの場合ワンショットの観測帯域は 40 nm 程度である。

この式より、分光範囲を広げるためには Δf_{rep} を小さくする必要があることが分かるが、デュアルコムビート線幅が Δf_{rep} より細い必要がある。また、高速測定のメリットとして短時間に多くの測定データを取得できるため、測定データの積算によるSN比の大きな向上が見込めるが、積算可能な測定時間はビート線幅の逆数で決定されてしまう[3]。そのためデュアルコム分光を行う上では狭線幅な光周波数コムのために、 f_{rep} と f_{ceo} の両方の相対的な安定化が必要である。

3. モード同期レーザー概要及び f_{rep} 安定化

2台の光周波数コムの概要を図2に示す。

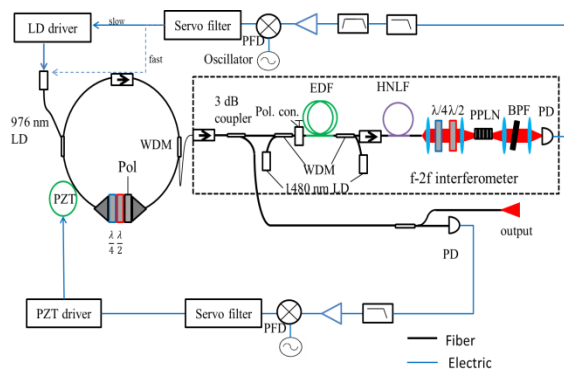


図2 光周波数コム概要図

これは産総研で開発された Er 添加ファイバモード同期レーザーによる光周波数コム[4]を参考に構築され、片方は共振器長をステージの遅延により可変にすることで、 f_{rep} を大きく変化させることが可能になっている。また、それぞれファイバの一部を円筒型の圧電素子(PZT)に巻きつけることにより、 f_{rep} を電氣的に制御可能にしている。これにより、圧電素子によるフィードバック制御によって、 f_{rep} の安定化を可能にしている。

共振器からの出力はファイバカップラによって 1:1 に分岐され片方の出力はそのままフォトディテクタ(PD)によって検波され、その信号を用いて f_{rep} 制御を行い、もう一方の出力は $f-2f$ 干渉計へと続いている。

次に共振器長固定コム(固定コム)と共振器長可変コム(可変コム)のモード同期時のスペクトルを示す。

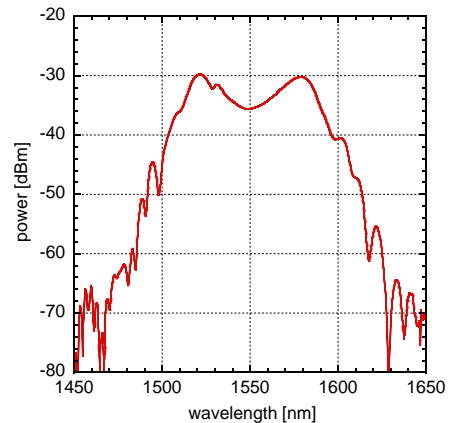


図3 モード同期時のスペクトル(固定コム)

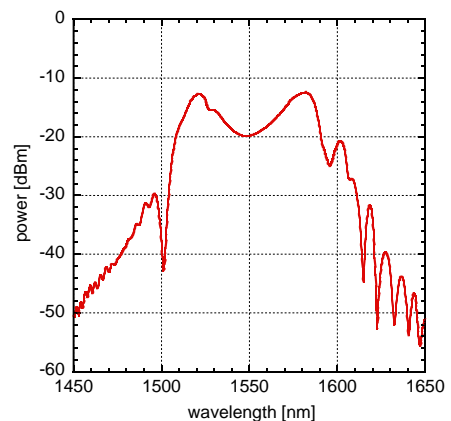


図4 モード同期時のスペクトル(可変コム)

スペクトルの形状からわかるように、共振器内の分散は正常分散よりになっている。このときのそれぞれの f_{rep} はおよそ 54 MHz 程度であり、その出力は 5 mW 程度であった。

次に f_{rep} の安定化を行った際の周波数安定度のアラン分散を示す。

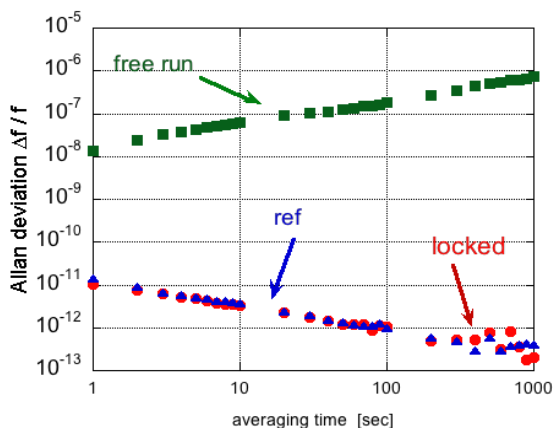


図 5 固定コムの f_{rep} の周波数安定度

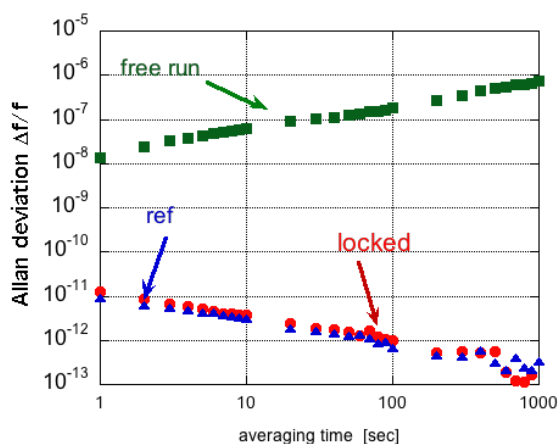


図 6 可変コムの f_{rep} の周波数安定度

この時周波数安定度は基準の周波数分の揺らぎ $\Delta f/f$ によって定義している。図 5,6 からそれぞれの安定度は基準周波数の安定度によってリミットされていることが分かる。デュアルコム分光においては線幅、つまりは短期の安定度が重要になるが、その安定度は一秒で 10^{-11} を達成した。それぞれの f_{rep} の光領域における寄与は、 f_{rep} の安定度は相対安定度であるためおよそ 2 kHz 以上であることになる。しかしながら、同じ周波数基準に同期した場合その絶対的なゆらぎは相対的にキャンセルされる

ため、デュアルコムはさらに安定である可能性は十分である。

4. f - $2f$ 干渉計による f_{ceo} の検出及び安定化

次に光周波数コムを完成させるうえで重要な f_{ceo} 検出のための f - $2f$ 干渉計の開発を行った。そのセットアップを次に示す。

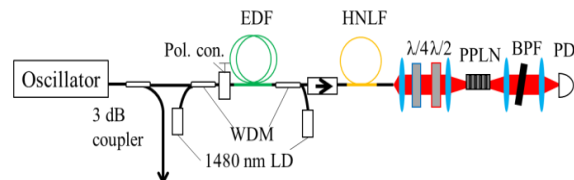


図 7 f - $2f$ 干渉計のセットアップ

f - $2f$ 干渉計はモード同期レーザーのスペクトルを非線形効果によってオクターブまで拡大し、スペクトル内で長波長側の光の第 2 高調波を短波長側の光と干渉させることで f_{ceo} を検出する方法であり、式で表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} 2f_m \cdot f_n &= 2f_{ceo} + 2mf_{rep} - (f_{ceo} + nf_{rep}) \\ &= (2m - n)f_{rep} + f_{ceo} \dots (3) \end{aligned}$$

このとき式(3)の f_{rep} の通倍の項は電気的 LPF(Low pass filter)によって容易に切り落とせるため、 f_{ceo} の検出が可能である。

実際のセットアップは共振器からの出力を EDFA(Erbium doped fiber amplifier)によって増幅し、HNLF(High nonlinear fiber)を伝搬させることで非線形効果によってオクターブまでスペクトルの拡大を行い、その光を第 2 高調波発生用の PPLN(Periodically poled lithium nionate)に入射し、SN 比向上のため BPF(Band pass filter)と LPF(Long pass filter)によって $1 \mu\text{m}$ の光以外の光を遮断し、PD で受光している。この方法によって検出された f_{ceo} を次に示す。

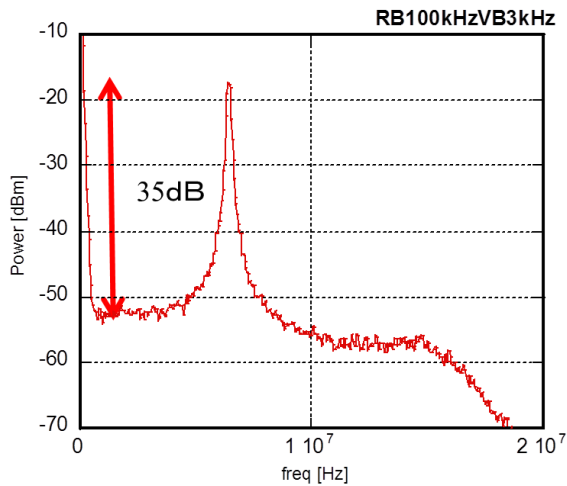


図 8 検出された f_{ceo} (共振器長固定)

始めに検出した際には制御に必要な SN 比である 30 dB 以下の SN 比であったが、アライメントや HNLF の長さ, HNLF 入射前のパルスに与える分散を変化させることでオクターブ光のスペクトル形状の変化や雑音の振る舞いの変化[5]などを調整し、必要な SN 比 30dB 以上を達成することができた。

次にその安定化実験を行った。 f_{ceo} の安定化は共振器励起用 LD の電流に誤差信号をフィードバックすることによって制御可能である。このとき制御帯域拡大のため、LD ドライバの変調端子への帰還に加えて LD のゲインチップへの直接帰還との併用制御による制御を行った。これは LD ドライバが高次の LPF の特性を有しており、その特性によって制御帯域が制限されてしまうため、直接電流を LD にフィードバックすることによって、より広帯域の制御帯域を実現するためである。制御回路の最適化を行い安定化した結果を次に示す。

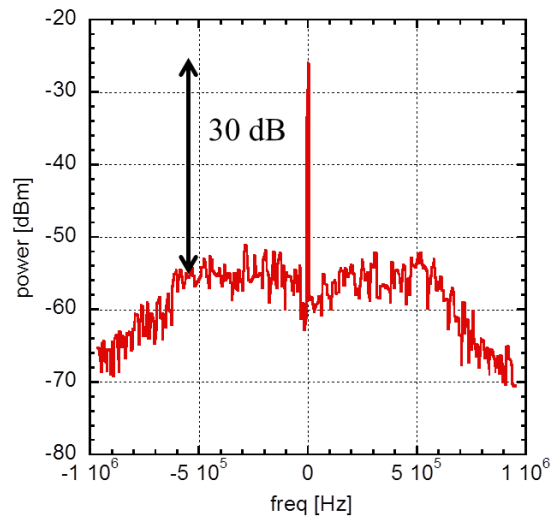


図 9 安定化した f_{ceo} (共振器長固定)

このとき RBW:1 kHz VBW:1kHz であった。図 8 をみてわかるように f_{ceo} の周波数成分のほとんどを中心のコヒーレントピークに集めることができている。この時の制御帯域はおおよそ 200 kHz であった。もう一台の共振器も同様に $f-2f$ 干渉計の開発と f_{ceo} の安定化をおこなった。このときの $f-2f$ 干渉計のセットアップは図 7 とほぼ同じであったが、異なる点として EDFA の励起 LD を 975 nm にしさらに励起方法を双方向励起から後方励起に変更した。その結果 f_{ceo} の検出に成功し、その時の SN 比は 30dB 程度であった。同様に共振器の励起用 LD の電流制御によって f_{ceo} の安定化を行った。安定化した f_{ceo} を次に示す。

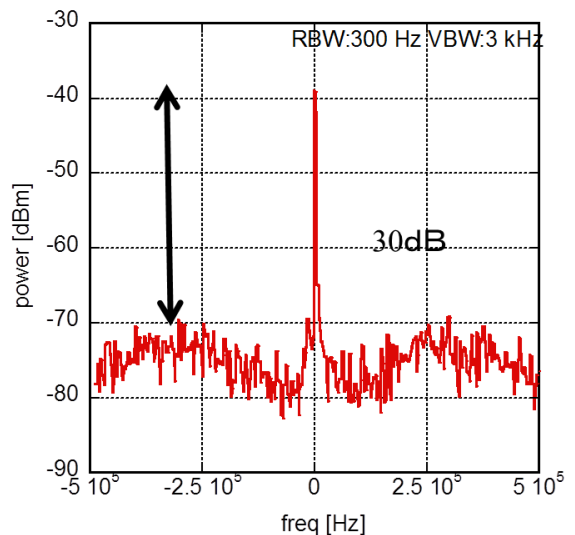


図 10 安定化した f_{ceo} (共振器長可変)

こちらにも同様に十分に f_{ceo} の線幅を狭帯化できていることが分かる。このときの制御帯域はおよそ 150 kHz であった。

次にそれぞれの f_{ceo} の安定度を評価するために、周波数安定度のアラン分散の測定を行った。その結果を次に示す。

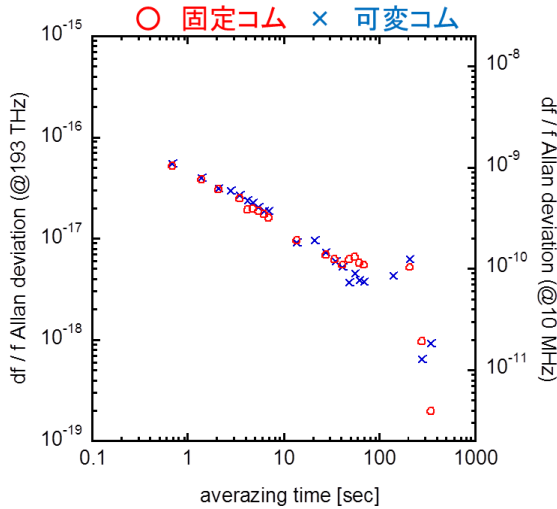


図 11 f_{ceo} のそれぞれの周波数安定度

このとき左縦軸は光の周波数に対する f_{ceo} の周波数安定度を表し右縦軸は制御の参照信号に用いたマイクロ波に対する f_{ceo} の安定を示している。

図 11 から光の周波数域の f_{ceo} の寄与は一秒 10^{-17} 台であり、これは平均時間一秒の際の f_{ceo} のゆらぎが 0.1 Hz であることを示している。このことから両光周波数コムの f_{ceo} のゆらぎはデュアルコム分光に用いる上でほぼ無視できる程度まで安定化できたことがわかる。

5. デュアルコムビート検出

以上から 2 台の光周波数コムの完成が確認できたため、デュアルコムビート検出実験を行った。その実験系を次に示す。

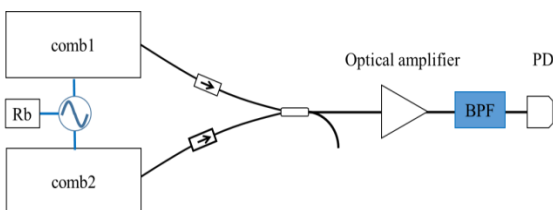


図 11 デュアルコムビート検出系

2 台の光周波数コムはそれぞれ同じルビジウ

ム発振器を基準としたシンセサイザに位相同期をしている。それぞれの出力をファイバコプラによって合波し、光ファイバアンプによってその出力を増幅しその信号光を PD によって受光している。このときの Δf_{rep} はおよそ 100 kHz に設定していたため、エイリアシング防止のため BPF を挿入している。得られたインタフェログラム (干渉波形) を高速フーリエ変換することでデュアルコムビートの検出を試みた。その結果を次に示す。

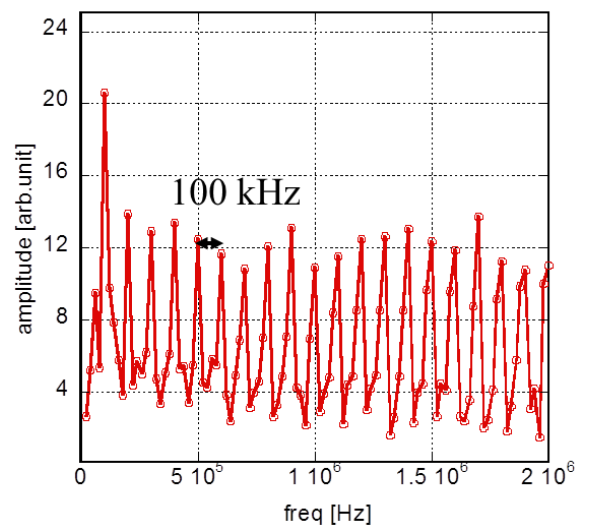


図 12 検出できたデュアルコムビート

図 12 から設定した 100 kHz 間隔のデュアルコムビートを検出することができていることが確認できる。このときのビート線幅を測定したところおよそ 2 kHz であった。このことから式(2)から求まる現在のワンショットの分光帯域はおよそ 1 nm 程度であり、一回の測定でおよそ数本の線形吸収を測定可能である。

しかし、この範囲はモード同期レーザーのスペクトルの全てを活かしきれておらず、積算可能な時間も十分に長いとは言えないため、実際に分光結果の評価の前にビート線幅のさらなる狭帯化を行う必要があると考えた。

6. デュアルコムビートのさらなる狭帯化実験

現在の光周波数コムの短期安定度は図 5,6,11 から f_{rep} によって支配されていると考えられ

る。これ以上の f_{rep} の安定度を得るためには f_{rep} を縦モード間のビート周波数を安定化するのではなく、光の領域で直接安定化することでさらなる安定度が得られる。これは f_{rep} を縦モード間のビート周波数で安定化した場合は式(1)からわかるようにその安定度がN通倍されてしまうためである(図13)。

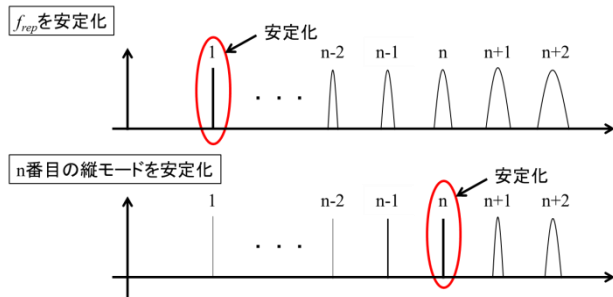


図13 f_{rep} を安定化した場合と光領域で直接安定化した際の比較

また、今回の場合は相対的な安定度で構わないため、光周波数コム間のビート周波数を片方の共振器長制御によって安定化することで、さらなる短期の安定度を得ることができる。

しかし、今回の場合光コム間のビートは通常のCWレーザーのように得ることはできない。なぜならデュアルコムビートがコム間ビートとして検出されてしまうためである。そのため、CWレーザーとそれぞれの光周波数コムをビートを検出し、その信号を電気ミキサによって差周波を検出することによりCWレーザーの影響を受けずにかつ、デュアルコムビートフリーなコム間ビートを検出する方法を選択した[6]。その実験セットアップを次に示す。

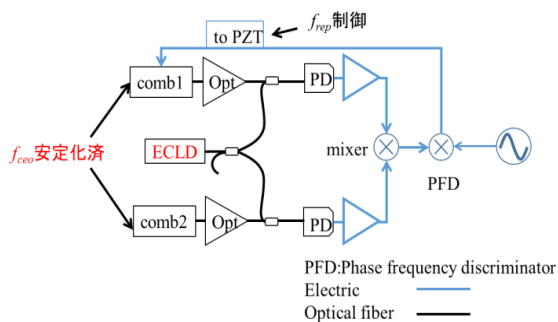


図14 コム間ビート検出実験セットアップ

これより得られたビート周波数を片方の共振器のPZTにフィードバック制御することによりその安定化を図った。その結果安定化することには成功したもののコム間ビートを狭窄化することはできなかった。これはPZTによる共振器長制御の制御帯域が1kHzと十分に高速制御可能ではないためである。そのため、今後は高速PZTやEOMなどの高速アクチュエーターを用いた共振器長制御の高速化を行う必要がある。

7. まとめと今後の展望

中赤外分光システムのための近赤外デュアルコム分光装置の開発をおこなった。2台の光周波数コムを完成させ、デュアルコムビートの検出に成功したものの、広帯域の分光のためにはさらなる共振器長制御の高速制御化が必要であることが分かった。今後は高速制御化によるデュアルコムビートの狭窄化の後、分光によるシステムの評価を行う。その後、中赤外分光のための実験を行っていく。

8. 参考文献

- [1] I. Coddington, W. C. Swann, and N. R. Newbury, Phys. Rev. Lett. **100**, (2008) 013902
- [2] I. Coddington, W. C. Swann, and N. R. Newbury, Optica **3**, (2016) 414-426
- [3] I. Coddington, W. C. Swann, and N. R. Newbury Phys. Rev. A **82**, 043817
- [4] Inaba, Hajime, et al. Optics express **14** (2006) 5223-5231
- [5] Washburn, Brian R., and Nathan R. Newbury., Optics express, **12**, (2004), 2166-2175
- [6] Kuse, Naoya, Akira Ozawa, Yohei Kobayashi. Applied Physics Express **5** (2012) 112402