

広帯域狭線幅光源のための光周波数コムの開発

武者研究室 松丸直也

1. はじめに

現在、レーザーの応用として高精度分光[1,2]や絶対周波数の測定[3]、時間・長さ標準[4]などがあるが、これらの応用には周波数安定化レーザーが用いられる。レーザーの周波数安定度はレーザーの周波数を f 、その周波数雑音を Δf としたとき $\Delta f/f$ で表され、周波数安定化レーザーは周波数雑音 Δf を低減することで実現できる。高い周波数安定度を得るための方法として負帰還制御を用いた周波数の制御があり、この方法では原子・分子の吸収線や光共振器の共振周波数、他の周波数安定化レーザーなどの安定な周波数基準に対しレーザーの周波数を一致させる[5]。この時のレーザーの周波数安定度は周波数基準の周波数安定度に依存する。また開発したレーザーの線幅評価にも周波数安定度の高いレーザーが必要となる。何故ならば、レーザーの周波数は数百 THz と非常に高く、直接検出は不可能であるためである。周波数安定度の非常に高いレーザーはコヒーレン長が非常に長いいため、線幅評価には同程度以上の周波数安定度のレーザーを用いられる。2つのレーザーのヘテロダインビートを検出すると、RF領域でヘテロダインビートが観測され、その線幅は2つのレーザーのうち周波数安定度の低いレーザーに依存するため、これによって線幅の評価を行うことができる。

上記のとおり、レーザーの周波数安定化及び線幅評価には周波数安定度の高い基準やレーザーが必要であるが各応用において周波数基準を準備することは原子分子の吸収線が離散的かつ特定の周波数帯でのみ存在し、光共振器の線幅にも周波数依存性があることから困難である。従って本研究では広い周波数帯域で用いることのできる広帯域

周波数基準として光周波数コムを開発する。光周波数コムとは図1の様に光周波数領域において全ての縦モードが安定化された縦モード列であり、それらの縦モード列は次数 n 及び、マイクロ波周波数である各縦モードの間隔 f_{rep} 及びゼロオフセット周波数 f_{ceo} によって決定され、以下の式で表される。

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

そのため光周波数領域の縦モードのうち2つの周波数を安定化することで、全ての縦モード列を安定化し、光周波数コムを開発することができる。本研究ではファイバーモード同期レーザーを開発し、 f_{ceo} と f_{rep} の2つのパラメーターを周波数安定化することによって、1秒で周波数安定度 10^{-15} の光周波数コムを開発する。

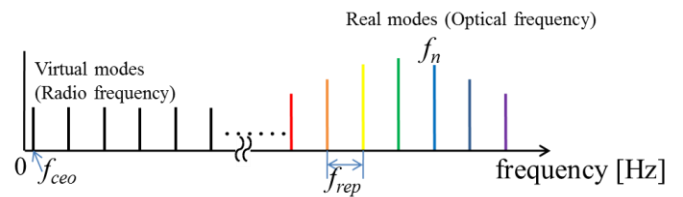


図1 光周波数コム

2. 光周波数コムの開発

2.1. モード同期レーザーの開発

本研究では光周波数コムの光源としてErファイバーモード同期レーザーを開発した。この光源はオールファイバー化が可能であるため長期動作に優れている。モード同期レーザーは図2の様になっており、励起光源として発振波長976 nmのファイバーブラッググレーティング付きの波長安定化

レーザーを用いている。また非線形偏波回転を用いたモード同期を行うためにポライザー、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 板を挿入し、片方向発振するためのアイソレーターにもポライザーがついている。モード同期レーザーの繰り返し周波数 f_{rep} は共振器長によって決まるため、これのためにPZTとEOM(Electro Optic Modulator)を併用しており、これにより広いダイナミックレンジと高速制御を可能としている。またEOMとアイソレーター間のファイバーのみ偏波保持ファイバーとなっている。各波長板とポライザーを調整し、モード同期発振時の発振スペクトルと時間波形を図3,4に示す。この時の平均出力は0.6 mWであり、繰り返し周波数は共振器長に対応した約50 MHzであった。この強度はEOMが約2.7 dBの挿入損があるため、低いものとなっていると考えられる。

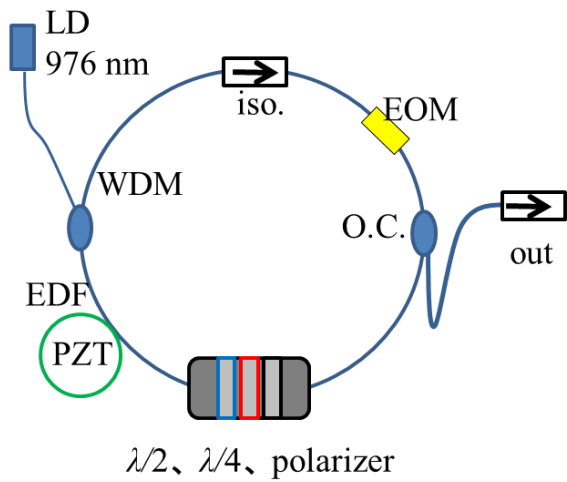


図2 モード同期レーザー

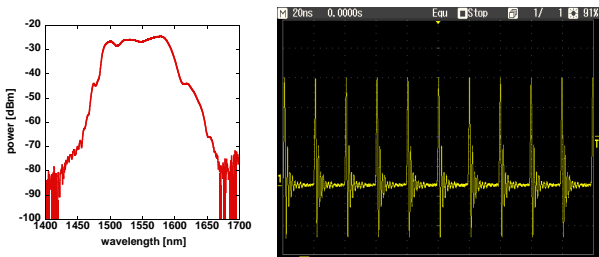


図3 発振スペクトル 図4 時間波形

2.2. f_{ceo} の安定化

光周波数コム縦モードは2つの周波数 f_{ceo} と f_{rep} によって決まるため、光周波数コムの周波数安定度もこれらの周波数安定度に依存する。そこで2つの周波数安定度の n 次の縦モード f_n の周波数安定度に対する寄与を考えると、

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta f_{ceo}}{f_{ceo} + n \cdot f_{rep}} \approx \frac{1}{n} \frac{\Delta f_{ceo}}{f_{rep}} < \frac{1}{n} \frac{\Delta f_{ceo}}{f_{ceo}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{n \cdot \Delta f_{ceo}}{f_{ceo} + n \cdot f_{rep}} \approx \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} \quad (3)$$

で表される。ここで f_{rep} は50 MHzであり、 f_{ceo} は f_{rep} よりも小さい。そして f_n は光周波数領域の縦モードであるため数百 THzであり、次数 n は 10^6 オーダーである。この式から、 f_{ceo} はその周波数雑音 Δf_{ceo} がそのまま f_n に寄与するために、光周波数領域に対する周波数安定度の寄与は n 分の1となることが分かる。 f_{rep} については周波数雑音 Δf_{rep} が n 倍されるために、その周波数安定度は光周波数領域の周波数 f_n の周波数安定度に対してそのまま寄与する。負帰還制御により周波数安定化を行った時の周波数安定度は周波数基準に依存するため、光周波数コム縦モード f_n において 10^{-15} の周波数安定度を目指すとき、 f_{ceo} の安定化に用いるマイクロ波周波数基準の周波数安定度で十分である。

本研究では f_{ceo} の検出のために図5のようなf-2f干渉計を開発した。まずモード同期レーザーの出力3 dBカプラーで2つに分け、図5の光学系に入射する。その後パルスを自作のEDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)でアンプする。EDFAの入出力特性を図6に示す。

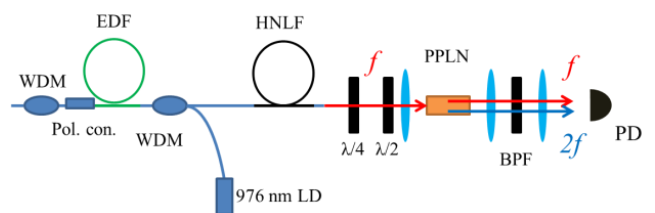


図5 f-2f干渉計

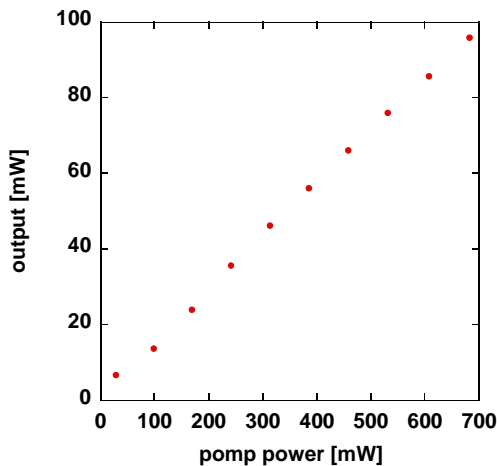


図 6 EDFA の出力特性

アンプ後のパルスは高非線形ファイバー(HNLF: High Nonlinear Fiber)に入射し、非線形光学効果によりスペクトルが拡大する。この効果によってスペクトルをオクターブ以上広げる。この時の低周波数側の縦モードを f_a 、高周波数側の縦モードを f_b とする。ファイバーから出射されたレーザー光は PPLN(Periodically Polled Lithium Niobate)によって低周波数側の第二高調波が発生する。この時のスーパーコンティニューム光及び第二高調波を図 7 に示す。

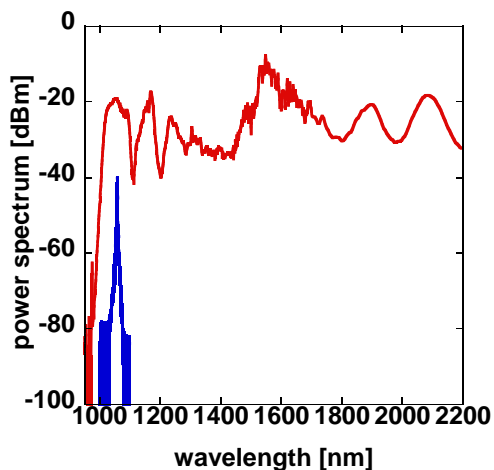


図 7 基本波と第二高調波

赤が HNLF によって広がったスーパーコンティニューム光、青が PPLN によって発生した第二高調波である。オクターブ以上広げた場合、図 7 のように基本波と第二高調波のスペクトルが重なっていることが分かる。その後高周波数側の基本波 f_b と低周波数側の第二高調波 $2f_a$ のヘテロダインビート f_{beat} が光検出器で検出される。この f_{beat} は、

$$f_{beat} = f_{ceo} + (2a - b) \cdot f_{rep} \quad (4)$$

で表される。ここで f_{rep} の倍数の信号は電気的なローパスフィルターによってカットできる。HNLF の前後のファイバーの長さや偏光状態、EDFA の出力のパワーなどを調整することで約 30 dB の SN 比で図 8 のような f_{ceo} を検出した。その後、マイクロ波基準との位相差を検出し、モード同期レーザーの電流源に制御信号を入力する。これは時間軸上でのパルス列(図 9)を考えたとき、 f_{ceo} がパルスのキャリアエンベロープ位相 ϕ_{cep} のパルス間での差、 $\Delta\phi_{cep}$ を用いて、

$$f_{ceo} = \Delta\phi_{cep} \frac{f_{rep}}{2\pi} \quad (5)$$

と表されるからである。すなわち、励起 LD のパワーを制御することでパルスのピークパワーを制御し、 f_{ceo} を制御することができる。

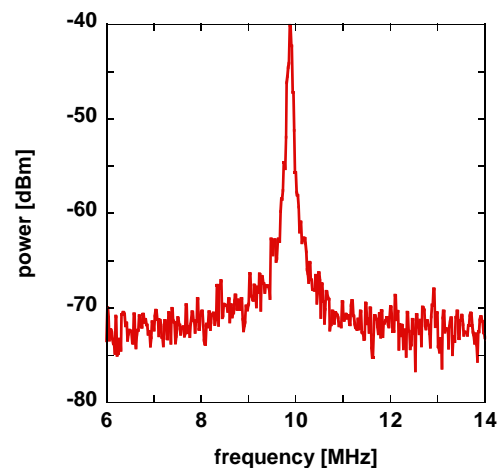


図 8 検出した f_{ceo}

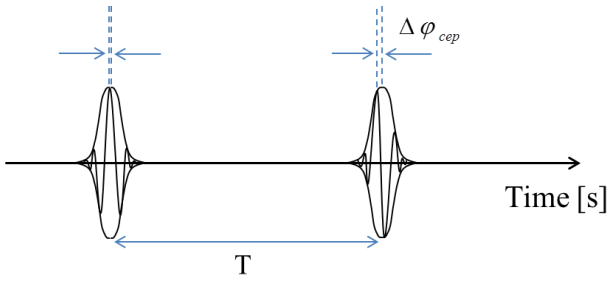


図 9 時間軸上でのパルス列

次に検出した f_{ceo} をマイクロ波周波数基準に対して位相同期を行うことを目指した。しかし、現状では f_{ceo} はマイクロ波周波数基準の発振周波数に対して追従はするものの線幅が狭窄化することはなかった。これは検出されたい雑音を検出器のダイナミックレンジ内に収まっていないことから起きたと考えられる。本研究では位相差を検出する際、位相周波数弁別器(PFD: Phase Frequency Discriminator)を用いている。これは位相差に比例した出力電圧の特性を持ち、 $-2\pi \sim 0$ rad までの位相差を約 0~2 V の範囲でほぼ線形に出力する。狭窄化が起こらなかった際の PFD の出力信号を測定すると図 10 のような 0~2 V の飽和した信号が見えた。このことから PFD のダイナミックレンジよりも大きい位相差が入力されたために線形範囲に収まらなかったことから、位相同期をできず f_{ceo} の信号が安定化されなかったと考えられる。これを解決するには PFD に入力される雑音を抑える必要がある。そのため今後は分周で雑音を抑える、もしくは制御帯域を拡大により現状よりも雑音を抑えることが求められる。これらの対策によって安定化した際の f_{ceo} の安定度はマイクロ波周波数基準と同等か、それ以下になると考えられる。仮に s 分周を行い安定化した際の安定度は、マイクロ波周波数基準の安定度よりも s 倍ほど悪化すると考えられるが、(2)式より光周波数領域の縦モードの周波数安定度に対する f_{ceo} の安定度の寄与は次数 n があるため、1 秒で 10^{-15} の安定度を目指す場合は問題ないと考えられる。

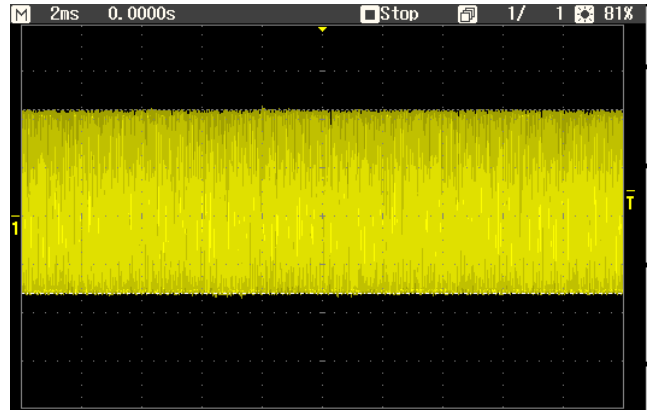


図 10 飽和した PFD の出力

2.3. f_{rep} の安定化

(3)式を見てわかるように、 f_{rep} の安定度は光周波数コム全縦モードの安定度に対して直接寄与する。本研究ではまず、モード同期レーザーの各縦モードのヘテロダイビートとして f_{rep} を検出し、それをマイクロ波周波数基準に対して位相同期を行った。その時の f_{rep} の周波数安定度のアラン分散は図 11 の様になった。赤が制御時で青が無制御時である。安定化した際は 1 秒で 10^{-11} の安定度であり、無制御時よりも 3 桁ほど安定度が向上した。しかしこの周波数安定度は用いたマイクロ波周波数基準により制限されており、さらなる安定度の向上はできない。そのため目標である 1 秒で 10^{-15} の周波数安定度はマイクロ波周波数基準では困難であると分かる。

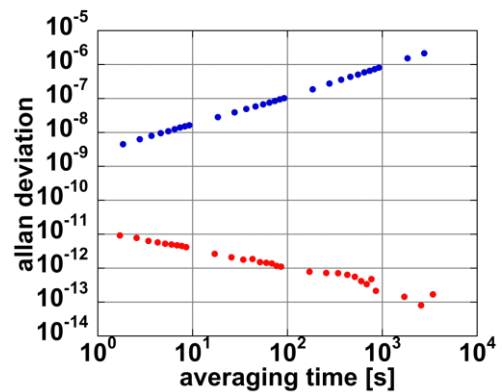


図 11 f_{rep} の安定度のアラン分散(マイクロ波)

そこで本研究では図 12 のような系で自作の EDFA によってアンプしたモード同期レーザーと 1 秒で 10-15 の安定度が実現可能な狭線幅光源[6]とのヘテロダインビートを検出する。そして検出された信号をマイクロ波周波数基準に対して位相同期することで、周波数安定化を目指した。なお、制御信号は低速部と高速部に分かれており、それぞれ PZT と EOM に帰還している。また設計・実装した制御回路の高速部には一般的な電圧帰還オペアンプではなく、高速応答が可能な電流帰還オペアンプを用いている。図 12 のような系で f_{ceo} と f_{rep} の安定化を行った場合を考える。まず f_{ceo} はマイクロ波周波数基準に位相同期されるため、その雑音 Δf_{ceo} はマイクロ波周波数基準によって決定され、1 秒で数 mHz オーダーであると予想される。またモード同期レーザーのある縦モード f_m は狭線幅光源に同期されており、仮に狭線幅光源の線幅を 1 Hz とすると、縦モードの線幅も 1 Hz となる。ここで f_m は狭線幅光源の周波数を f_{CW} 、マイクロ波基準の周波数を $f_{\mu freq}$ とすると、

$$f_m = f_{ceo} + m \cdot f_{rep} = f_{CW} + f_{\mu freq}. \quad (6)$$

である。雑音成分を考えると、 f_{ceo} の持つ雑音 Δf_{ceo} はマイクロ波周波数基準に位相同期した場合、数 mHz オーダーであり、 $\Delta f_{\mu freq}$ も同様である。これらの値は狭線幅光源の線幅 1 Hz と比べて十分に小さい。そのため、 f_{rep} の安定度は

$$\frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} = \frac{\Delta f_{CW}}{f_{CW}} \quad (7)$$

となる。(3)式より、 f_{rep} の安定度は全ての縦モードに対して直接寄与し、なおかつ f_{ceo} は n 分の一で寄与するため、全ての縦モードの安定度は 1 秒で 10^{-15} の周波数安定度を実現できる。

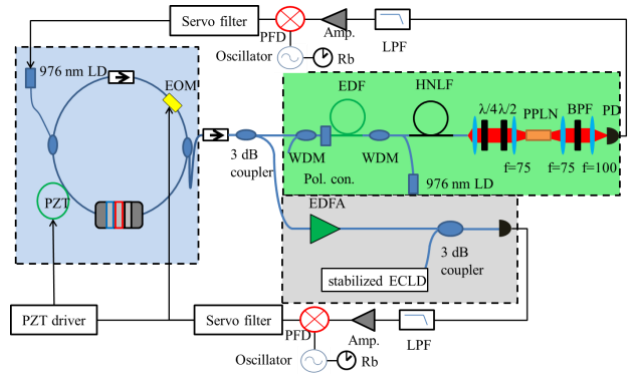


図 12 光周波数コムの実験概要図

本研究ではまず無制御の外部共振器型半導体レーザー(ECLD: External Cavity Laser Diode)を用いて実験を行った。図 12 の実験系でモード同期レーザーと無制御の ECLD とのヘテロダインビートを安定化した際の位相雑音スペクトルを図 13 に示す。赤い線が安定化した際のスペクトルであり、青い点線が無制御時のスペクトルの推定値である。制御帯域は 300 kHz であった。

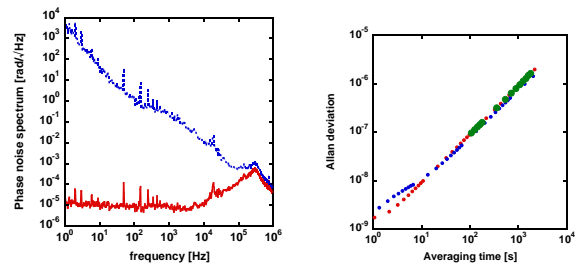


図 13 雑音スペクトル 図 14 アラン分散(光)

この時の周波数安定度を評価するために、ECLD に対して位相同期を行ったモード同期レーザーの f_{rep} を周波数カウンターによって測定した。その時の f_{rep} の安定度のアラン分散を図 14 に示す。赤のプロットが制御時、青のプロットが無制御時であり、これらはほぼ一致している。また f_{rep} と同時に ECLD の周波数を波長計を用いて測定した。その時の ECLD の周波数安定度も緑のプロットで図 14 に載せる。なお、短時間の安定度については波長計の分解能によってリミットされているため、長時間の安定度のみを載せる。図 14 を見ると ECLD

の安定度と f_{rep} の安定度が一致しており、このことから長期的な安定度については ECLD の発振周波数のシフトによって決定されていると分かる。次に短期的な安定度について考えると、1 秒での f_{rep} の安定度は 10^9 オーダーであり、その雑音 Δf_{rep} は 100 mHz オーダーである。そこで無制御の f_{ceo} と ECLD の発振周波数 f_{CW} の雑音が f_{rep} の雑音にどのように寄与するかを考えると、それぞれ

$$\Delta f_{rep} = \frac{1}{n} \Delta f_n = \frac{1}{n} \Delta f_{ECLD} \quad (8)$$

$$\Delta f_{rep} = \frac{1}{n} \Delta f_{ceo} \quad (9)$$

で表される。ここで f_{ceo} の線幅を f-2f 干渉計、 f_{CW} の線幅を自己遅延ヘテロダイン法を用いて測定した。それぞれの線幅は図 15 のようになり、赤が ECLD、青が f_{ceo} である。 $\Delta f_{ceo} = 74$ kHz、 $\Delta f_{CW} = 9.5$ kHz であった。ここから(8),(9)式を用いて f_{rep} に対する寄与を考えると、 f_{ceo} は 190 mHz、 f_{CW} は 2.4 mHz となり、このことから短期的な安定度に関しては無制御の f_{ceo} によってリミットされていることが分かる。そのため f_{ceo} と ECLD を安定化することが求められ、これら二つの線幅をそれぞれ 1 Hz 以下にすることができれば全縦モードが 1 秒で 10^{-15} の周波数安定度の光周波数コムを開発することができる。

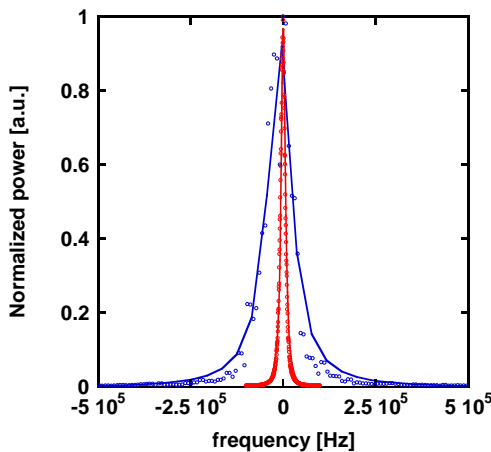


図 15 ECLD と f_{ceo} の線幅

3. まとめと今後の展望

本研究では広帯域で用いる光周波数基準のために 1 秒で 10^{-15} の周波数安定度を持つ光周波数コムを開発を目指した。そのために Er 添加ファイバーを用いたモード同期レーザーを開発した。その後、光周波数コムを開発するため 2 つのパラメータの周波数安定化を行った。現在の光周波数コムは短期的には無制御の f_{ceo} によって支配されていることが分かっているため、今後は分周や制御帯域を拡大する方法によってマイクロ波周波数基準に対し位相同期を行い、 f_{ceo} の狭窄化の必要がある。ECLD については本研究室の過去の研究[6]より十分な安定度が出ることが見込まれているため、ECLD の発振周波数を高フィネスの光共振器の共振周波数に対して同期することで 1 秒で 10^{-15} の周波数安定度を持った光周波数コムが開発できると考えられる。さらに、開発した高精度ファイバーリンクシステム[7]を構築することで、本研究室で開発している 515 nm ヨウ素安定化レーザーなどの他の帯域の線幅評価や他研究室に対して光周波数基準を配信することができると考えられる。

4. 参考文献

- [1] Bernhardt, B., et al. *Nature photonics* 4.1 (2010): 55-57
- [2] Thorpe, M. J., et al. *Optics Express* 16.4 (2008): 2387-2397
- [3] Gerginov, V., et al. *Optics letters* 30.13 (2005): 1734-1736.
- [4] Takamoto, M., et al. *Nature* 435.7040 (2005): 321-324.
- [5] Chen, Q-F., et al. *Applied Physics B* 107.3 (2012): 679-683
- [6] 清水光, 平成 26 年度電気通信大学光エレクトロニクスコース修士論文
- [7] Hong, F-L., et al. *Optics letters* 34.5 (2009): 692-694.