

精密マイクロ波発生のためのNALMモード同期レーザーの開発

武者研究室 遠藤 駿

1 はじめに

日本では、準天頂衛星「みちびき」を用いて、GPS(Global Position System) と組み合わせることによって高精度な位置情報の取得を行なっている。しかし、未だに自動運転などの高精度な位置情報を要求する応用において、位置決定精度では追いついていない。そこで、「みちびき」の後継機に正確なマイクロ波基準を載せる計画が進められている [1]。

現在の人工衛星のマイクロ波基準は Rb 原子時計で、周波数安定度が $\Delta f/f \simeq 10^{-12}$ 程度である [2]。高精度な位置決定システムのために、この周波数安定度を $\Delta f/f \simeq 10^{-15}$ 台にする必要がある。そのため、我々は、周波数安定度が $\Delta f/f \simeq 10^{-15}$ 台のヨウ素安定化レーザーとマイクロ波を発生する光周波数コムを組み合わせて目標の周波数安定度を持つマイクロ波基準の開発を行っている。

本研究では、このマイクロ波基準の光周波数コムの光源であるモード同期レーザーの開発を行った。

2 原理

2.1 精密マイクロ波発生の原理

光周波数コムは、図 1 周波数軸上で等間隔な縦モードを形成するレーザーである。この等間隔性は光周波数コムの光源に用いるモード同期レーザーによるものであり、この等間隔な周波数は、

$$f_{\text{rep}} = \frac{c}{L} \quad (1)$$

となる。この周波数を繰り返し周波数 f_{rep} とよび、共振器長に依存した値となる。この繰り返し周波数をマイクロ波として取得する。

n 番目の縦モードの周波数を f_n とすると、 f_n は繰り返し周波数 f_{rep} を用いて、

$$f_n = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} \quad (2)$$

となる。ここで f_{ceo} とは、キャリアエンベロープオフセットと呼ばれ、オフセット周波数として現れる。この f_{ceo} は、パルスのキャリアとエンベロープのズレから示され、励起強度などの変化によってエンベロープが変わるため f_{ceo} の値も変わってくる。

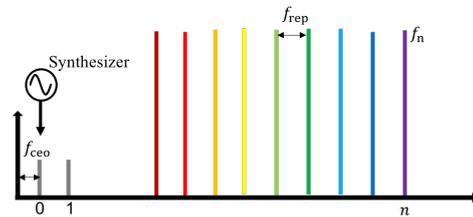


図 1: 光周波数コムの原理図

目的となる周波数安定度は以下の式で表すことができる。

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} \simeq \frac{\Delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}}} + \frac{1}{n} \frac{\Delta f_{\text{ceo}}}{f_{\text{ceo}}} \quad (3)$$

式 3 の通り、 f_{rep} が 10^{-15} 台を到達するには、 f_n も同程度の安定度、 f_{ceo} が 10^{-9} 台の安定度を持つ必要がある。そこで、それぞれを制御することが必須となる。 f_{ceo} の制御は、synthesizer との比較で制御を行うが、 f_{rep} は基準となるヨウ素安定化レーザーとのビート周波数を取得し、そのビート周波数が一定になるように f_{rep} に対して制御を行う。つまり、光周波数コムの制御としては、 f_{ceo} と f_{rep} の制御が必要となる。

2.2 NALM 型モード同期レーザーの原理

一般的に光周波数コムの光源として非線形偏波回転が用いられているが、人工衛星に搭載するために堅牢性が問題点となる。そこで、外乱に強いモード同期機構である NALM(Nonlinear Amplifying Loop Mirror) を用いたレーザーの開発に着手した。

NALM は、共振器中の CW(ClockWise) 方向の光と対向に入射された CCW(Counter ClockWise) 方向の光の非線形効果によって生じた位相差によってモード同期をかける技術である [3]。

図 2 が NALM の模式図である。エバネッセントカップリングや伝搬中の光の位相遅れを考慮すると、NALM の input に入射した光は input 側と output 側に戻ってきた際に、

$$\text{input} : 1/4[\cos(\omega t - kL) + \sin(\omega t - kL + \Delta\phi)] \quad (4)$$

$$\text{output} : 1/4[\sin(\omega t - kL) - \cos(\omega t - kL + \Delta\phi)] \quad (5)$$

となる。そして、非線形効果によって生じた位相差 $\Delta\phi$ を 180° 、 540° 、... としていくと output のみで光が

出てくるようになる。今回は、入射光がパルスのためこの条件がパルスのピークのみで起こるようにすれば可飽和吸収機構として働くようになる。

非線形効果が大きい方が位相差が大きくなりモード同期しやすくなるため、利得媒質の位置が偏っているほど望ましいが、一般的なNALMであると、非線形効果による位相差が小さく、高繰り返し化が難しいためCWとCCWで位相差を大きくつける phase shifter を挿入し、モード同期しやすくさせる。

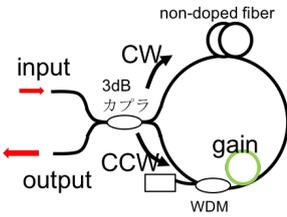


図 2: NALM の模式図

NALM は、偏光を利用しないため全偏波保持ファイバーでの構成が可能であり、外乱に強いレーザーと言える。しかし、強度変調由来のインシヤルパルスが起きにくく、セルフスタートが難しい傾向がある。

NALM を用いたモード同期レーザーとして figure-8 と figure-9 が存在する。

2.2.1 figure-8 レーザー

NALM として最初に考案されたものが figure-8 レーザーであり、文字通り 8 の字型のレーザーとなる [4]。

figure-8 は、phase shifter 以外が偏波保持ファイバーで構成され、phase shifter もコンポーネント化することによって小型化、堅牢化が可能であるため、外乱に強いレーザーとなる。しかし、強固であるがゆえにインシヤルパルスが発生しづらく、セルフスタートが困難なため、発進させる際にはファイバー部分を叩くなどの衝撃が必要となる。また、ファイバーコンポーネントが多いため高繰り返し化が難しく、モード同期レーザーの雑音特性を表す位相雑音も悪いとされている。

2.2.2 figure-9 レーザー

figure-9 レーザーも figure-8 と同様に文字通りの 9 の字型をしたレーザーである。figure-8 との大きな違いは、loop mirror か直線型の反射系かである [5]。一般的に figure-9 では、phase shifter や optical filter、回折格子対などを挿入することができることから空間系の反射系を組むことが一般的である。

figure-9 は、figure-8 に比べファイバーコンポーネントを少なくできることから高繰り返し化がしやすく、波長板や optical filter を自由に組み込めることからセル

フスタートが容易であるとされる。そのため、近年は光周波数コムのためのモード同期レーザーとして注目されている。しかし、空間系が多いということは、強い衝撃などに空間系が弱いということと同義であるため、空間系の固定方法が重要な課題となってくる。

3 NALM 型レーザーの開発

人工衛星の搭載という目的から光周波数コム光源として figure-8 レーザーの開発に着手した。しかし、figure-8 はセルフスタートが難しい問題が存在する。セルフスタートが困難であると、可飽和吸収体やファイバーに物理的に衝撃を与える機構を加える必要があるが、人工衛星に乗せることを考えると前者は 10 年以上の長期動作の面で、後者は積載量の面で問題となる。そこで、共振器内構成が変更容易である figure-9 レーザーを用いてセルフスタートする最適な利得ファイバー長や出力比を求めた。

3.1 figure-9 レーザーの開発

開発した figure-9 レーザーを図 3 に示す。利得ファイバーの EDF1 に吸収量が 80 dB/m、EDF2 に 7 dB/m の EDF を用いている。これは、モード同期レーザーの雑音特性が共振器内分散が 0 に近い領域であるストレッチパルス領域で優れているため、分散と利得の双方を調整するために挿入している。また、Er の吸収が NALM の位相差を大きくするためセルフスタートを得られやすいと見込んでいる。LD には、宇宙線対策に波長 976 nm を用いている。

phase shifter 部分には NALM 側から、ファラデーローテーター、 $\lambda/4$ 波長板、 $\lambda/2$ 波長板の順番で挿入している。

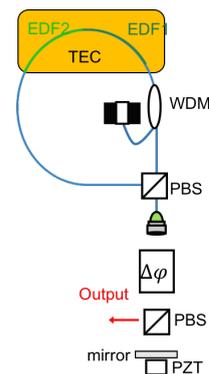


図 3: figure-9 レーザーの構成図

f_{rep} 制御のために共振器の EDF 部分を銅板に接触させ、ミラーには piezo 素子を貼り付けている。

3.1.1 figure-9 レーザーの出力特性

開発した figure-9 レーザーの出力を図 4、5 に示す。output の 1 % を取り出したモニターポートにて計測している。

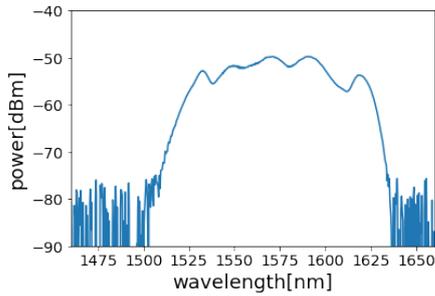


図 4: figure-9 レーザーの光スペクトル

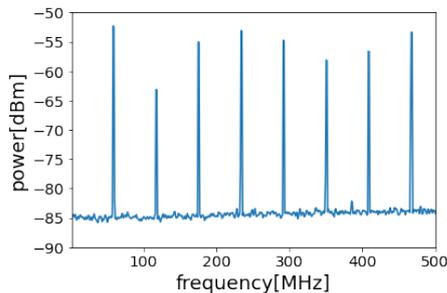


図 5: figure-9 レーザーの RF スペクトル

このレーザーはセルフスタート動作を可能とし、励起光が 100 mW 程度でのシングルパルス動作となる。そして繰り返し周波数が 58.2 MHz スペクトル幅は約 53 nm ほどとなっている図 5 から、強度変調が存在するように見える。これは、図 4 から光スペクトルの形状に通見られない構造が存在することなどから、モード同期が不安定なのではないかと推測する。これらは、ピエゾを貼り付けた際に使用したエポキシのアウトガスによってミラーもしくは他の光学部品が汚されてしまったことが考えられる。このことから、雑音性に関しては検討しなくてはならないが、安定動作性やセルフスタート、ストレッチパルスに見られる広いスペクトルを得られたため共振器構成は変えないこととした。

3.1.2 f_{ceo} の検出

EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier) によって増幅したパルスを自己相関係にて計測したものが図 6 である。自己相関波形からストレッチパルスのパルス波形である、 sech^2 型でフィッティングするとパルス幅が 45.1 fs である。スペクトル幅が 53 nm であることからフーリエ限界で sech^2 型で 48.2 fs と得られるが、これはオシレータでの値であり、EDFA によってスペクト

ルが変化するため EDFA 後のパルス幅とは異なる。平均出力は 110 mW である。

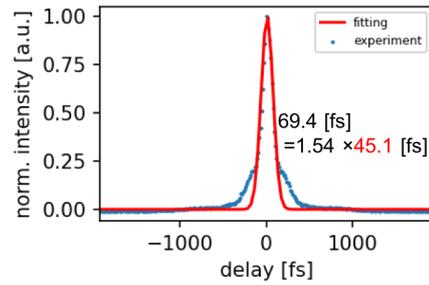


図 6: figure-9 レーザーの EDFA 後の自己相関波形

このパルスを HNLF(Highly NonLinear Fiber) に入射させ得られたオクターブ光を $f-2f$ 干渉計に通して得られた f_{ceo} 信号が図 7 である。繰り返し周波数に依存した折り返し周波数が確認できる。

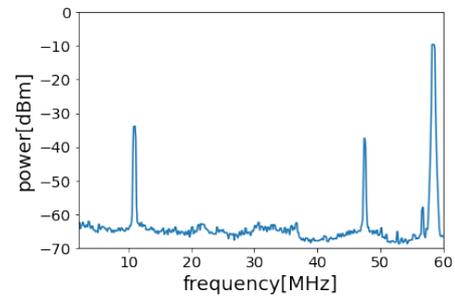


図 7: figure-9 レーザーの f_{ceo} 信号 (RBW100 kHz)

f_{ceo} の信号は、SN が 30 dB 以上あり制御可能であると判断した。また、フリーラン時の線幅は約 30 kHz 程度であった。

3.1.3 f_{ceo} の制御

検出した f_{ceo} 信号を電気フィルターによって f_{ceo} のみ切り出し、基準信号との誤差信号を制御回路に通して figure-9 レーザーの励起に用いている LD の電流源に返すことで制御をおこなった。制御下の f_{ceo} の RF スペクトルを図 8 に示す。

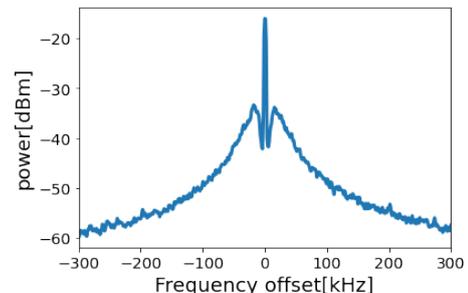


図 8: 制御下の figure-9 レーザーの f_{ceo} 信号 (RBW3 kHz)

制御帯域は、オープンループ利得から 20 kHz であった。制御回路では 100 kHz 程度まで位相を補償しているため、電流源やモード同期レーザーで位相が回っていることが考えられる。特に電流源においては 10 kHz から位相が回り始めるため、電流源を介さない制御をする必要がある。今後は LD に直接変調をかけることにより制御帯域を拡大する予定である。

3.1.4 f_{rep} の制御

figure-9 レーザーより得られた f_{rep} を電気フィルターで切り出し、制御可能となる -10 dBm 以上の信号強度にした後に基準信号との誤差信号を取得する。そして、温度とピエゾアクチュエータでの帯域を考え設計した制御回路に信号を入れて制御する。

f_{rep} のフリーラン時と制御時の変動を図 9、10 に示す。フリーラン時の変動は、断熱されたファイバ系よりも空間系の温度変化による影響が大きい。空間系はアルミブレッドボード状に配置されている。

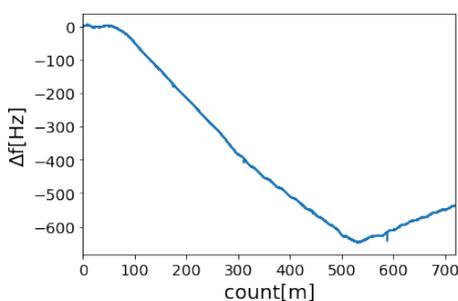


図 9: フリーラン時の f_{rep} の変動

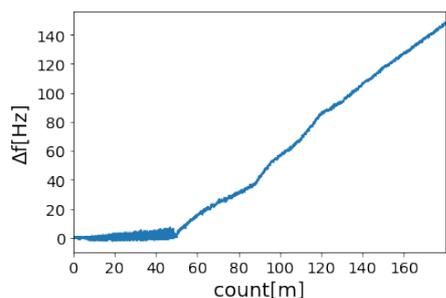


図 10: 温度制御+ピエゾ制御による f_{rep} の変動

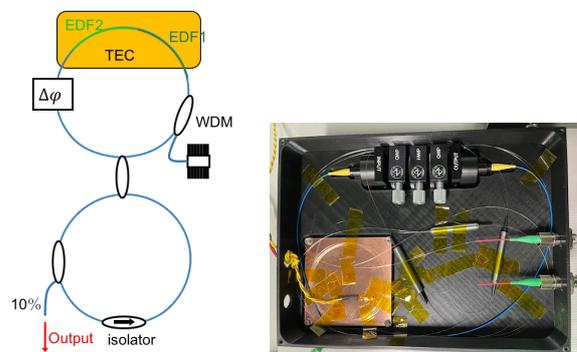
制御下において周波数変動を抑えられていることが確認できる。しかし、40 分を超えたあたりでフリーラン時のと同様の周波数変動となる。これは共振器の温度変化が大きく、温度制御のダイナミックレンジを超えてしまったため起きている。しかし、現在の figure-9 レーザーはファイバ部分を発泡スチロールで覆っているが、空間部分は断熱や風防をしていないため、外乱の対策をすれば抑えられると考えている。また、制

御下においてもピエゾの発振が確認できる。この周波数は 40 Hz 程度であり、ピエゾの応答性に起因する。そのため、制御帯域をさらに拡大するために、ファイバーに貼り付けた高速性のピエゾ、もしくは EOM を組み込む必要がある。

3.2 figure-8 レーザーの開発

figure-9 レーザーでセルフスタートとストレッチパルス動作が可能であったため figure-8 レーザーにおいても同様の利得ファイバ構成を用いて開発を行った。

開発した figure-8 レーザーの構成を図 11a に示す。こちらも figure-9 レーザーと同様のファイバを用いている。phase shifter は、ポラライザー、ファラデーローテーター、 $\lambda/4$ 波長板、 $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長板、ファラデーローテーター、ポラライザーの順番で挿入されている。



(a) figure-8 レーザーの構成図 (b) figure-8 レーザーの写真

図 11: 開発した figure-8 レーザー

今回開発した figure-8 レーザーの写真が図 11b である。大きさは、200 mm×150 mm×60 mm であり最小の巻き形が 50 mm になるように設計している。これは phase shifter の大きさで支配されているため、さらなる小型化のためには phase shifter の改良が必要となる。

3.2.1 figure-8 レーザーの出力

開発した figure-8 レーザーの出力を図 12、13 に示す。output を 100 % 取り出して計測している。

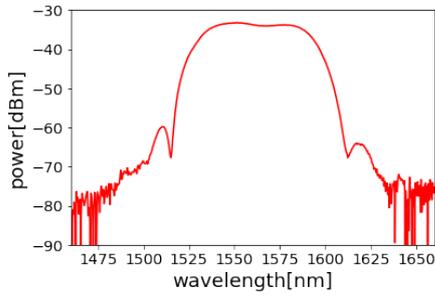


図 12: figure-8 レーザーの光スペクトル

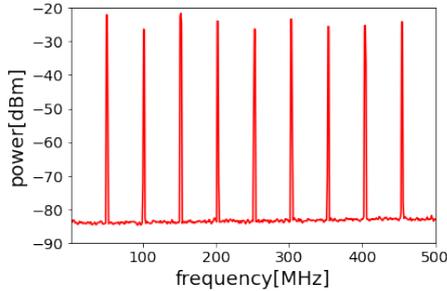


図 13: figure-8 レーザーの RF スペクトル

当初の目的通り従来難しいとされていた figure-8 レーザーのセルフスタート動作を可能とし、繰り返し周波数が 50.4 MHz となっている。シングルパルス動作は、励起光が 130 mW 程度となっている。これは本研究室で小型化していない figure-8 レーザーよりも高い閾値となる。そのため、小型化の際に巻き形による損失が出ていたと考えられる。そして、図 12 よりスペクトル幅は 58 nm 程度となっている。図 figure-9 と異なり強度変調のような成分や光スペクトルに構造がないこと、そしてセルフスタートを達成できたことから光周波数コムモード同期レーザーとして十分であると考えられる。

3.2.2 f_{ceo} の検出

EDFA によって増幅した後の自己相関波形が図 14 である。 sech^2 型でフィッティングすると 39.6 fs となった。この時の平均出力が 105 mW 程度である。

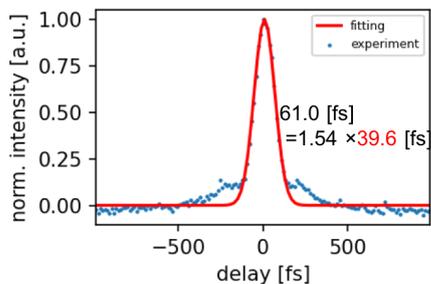


図 14: figure-8 レーザーの EDFA 後の自己相関波形

このパルスを HNLF に入射させ、得られたオクタブ光を $f - 2f$ 干渉計に通して得られた f_{ceo} 信号が図 15 である。

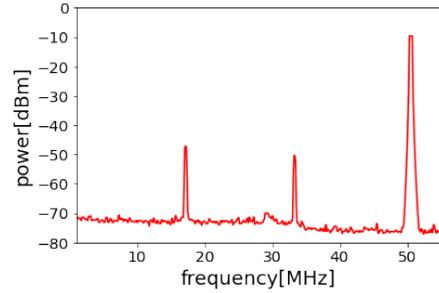


図 15: figure-8 レーザーの f_{ceo} 信号 (RBW100 kHz)

f_{ceo} 信号の SN は 28dB 程度であった。これは、制御可能となる SN が RBW100 kHz で 30 dB 以上であることから十分でない。しかし、HNLF 後のファイバー長を変えることで倍波とのタイミングを補償することで SN の向上が見込めるため今後改善が可能であると考えている。フリーラン時の線幅は 20 kHz 程度であった。

3.2.3 f_{rep} の制御

figure-9 レーザーと同様の回路を用いて制御したものが図 17 になる。

figure-9 レーザーではミラーを持っていたためピエゾを用いたが、figure-8 レーザーでは全ファイバー系なので高速制御のピエゾもしくは EOM が必要である。これらは、人工衛星搭載を考えた際のアクチュエーターが温度制御以外未定であるため採用していない。

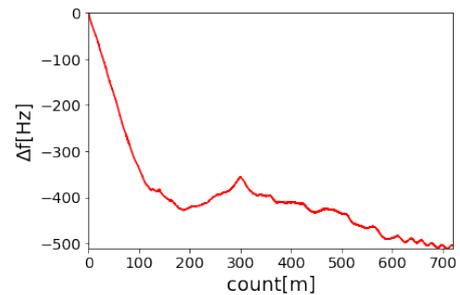


図 16: フリーラン時の f_{rep} の変動

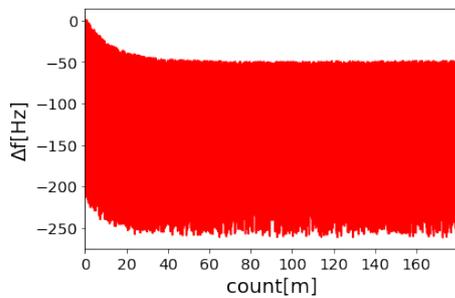


図 17: 温度制御時の f_{rep} の変動

制御下の周波数変動は ± 200 Hz であり、これは共振器長変動で $10 \mu\text{m}$ に相当する。しかし、この周波数変動は温度調整回路の PID を変更することにより抑えることが可能である。しかし、今回用いた温度調整回路はモジュール化されたもののため D を変更することができない。そのため、今後は PID を変更できる温度調整回路を自作する必要がある。

そして、ダイナミックレンジを抑え、高速応答のピエゾや EOM で帯域の拡大をする予定である。

4 まとめと今後の展望

GNSS の高精度化のための人工衛星搭載用のマイクロ波発生機となる光周波数コム光源として、NALM 型モード同期レーザーの figure-9 と figure-8 を開発した。figure-9 では、スペクトル幅 53 nm 、繰り返し周波数 58.2 MHz 、figure-8 では、スペクトル幅 58 nm 、繰り返し周波数 50.4 MHz の特性が得られた。また、人工衛星搭載に重要な要素である再現性のあるセルフスタートも双方で確認できた。特に figure-8 レーザーは、 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ の大きさで小型化に成功しており、この大きさは phase shifter の大きさで制限されているためさらなる小型化の可能性が期待できる。figure-9 レーザーでは、 f_{rep} を温度+ピエゾによる制御、 f_{ceo} を電流源への変調による制御を行った。 f_{ceo} は制御帯域 20 kHz 程度の制御帯域であった。figure-8 レーザーは f_{rep} の温度制御のみ行った。今後は、figure-8 レーザーの f_{rep} と f_{ceo} 双方の安定化を行い、小型化ができていない figure-8 レーザーを主体とした光周波数基準システムを開発する。そして、目的である周波数安定度 10^{-15} 台の安定度を達成することで、人工衛星搭載化への検討を進めていく。

参考文献

- [1] 河野功, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3P05, (2019).

- [2] Y. Lv, T. Geng, *et al.*, "Characteristics of BeiDou-3 experimental satellite clocks", *Remote Sensing*, **10**, No.11, (2018).
- [3] M. Fermann, F. Haberl, M. Hofer *et al.*, "Nonlinear amplifying loop mirror", *Optics Letters*, **15**, No.13, pp.752, (1990).
- [4] H. Lin, D. Donald, W. Sorin, "Optimizing Polarization States in a Figure-8 Laser Using a Non-reciprocal Phase Shifter", *Journal of Lightwave Technology*, **12**, No.7, pp.1121-1128, (1994).
- [5] W. Hänsel, H. Hoogland *et al.*, "All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, **123**, No.1, pp.1-6, (2017).