

Figure-8 型ファイバーモード同期レーザーの高速制御

武者研究室 山田 隆寛

1. 研究の背景

現在の GNSS(Global Navigation Satellite System)の周波数基準としてルビジウムマイクロ波周波数基準が用いられている。マイクロ波周波数の周波数安定度は $\Delta f/f \cong 10^{-12}$ 程度である。次世代の GNSS の周波数安定度の目標は $\Delta f/f \cong 10^{-15}$ である。しかしマイクロ波周波数領域では精度をこれ以上向上させることは難しいと考えられている。そこで光の持つ高い周波数安定度をマイクロ波周波数領域にダウンコンバートさせる手段が考えられている。ダウンコンバートをするために用いられるものとして光周波数コムがある。

光周波数コム[1][2]とは周波数軸上に多数の周波数成分が等間隔に並んだレーザーであり、光のものさしとして光の周波数の精密計測に利用することができる。縦モードの間隔はレーザー共振器のパルス列の繰り返し周波数に一致する。繰り返し周波数は非線形結晶等を用いることで周波数を基準であるヨウ素安定化レーザーと同期することができる。

本研究では光周波数コムを作成するにあたり求められている堅牢性を満たすために外乱に強い偏波保持ファイバーで構成され、過飽和吸収機構としてNALMを用い、低位相雑音特性のためにストレッチパルス領域での発振を目指したFigure-8型ファイバーモード同期レーザーの開発を行った。光周波数コムの制御のために小型の圧電素子を用いて共振器長を制御する実験を行った。

2. 原理

2.1 光周波数コム

光周波数コムとは周波数軸上に櫛(コム)のように正確に縦モードが並んだコヒーレントな光である。光周波数コムの n 番目の縦モードの周波数 f_n はくり返し周波数である f_{rep} とキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} を用いて、以下の式(1)のように表される[2]。

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

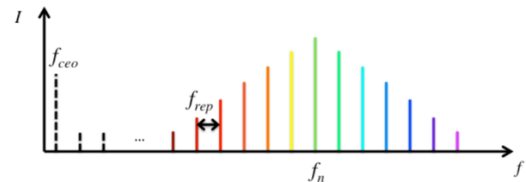


図 1.周波数軸上での光周波数コムの概念図

くり返し周波数である f_{rep} は、パルスの時間間隔、つまり時間差を Δt とすると

$$f_{rep} = \frac{1}{\Delta t} \quad (2)$$

と表され、モード同期レーザーの隣り合うピーク間の時間差 Δt は

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \quad (3)$$

と表されることより、 f_{rep} は共振器長に依存する。

f_{ceo} は時間軸上におけるパルス列のキャリア波と包括線のピーク間とのずれを表している。キャリア波と包括線とのピーク間のずれを $\Delta\phi$ とすると、

$$f_{ceo} = \frac{\Delta\phi}{2\pi} f_{rep} \quad (4)$$

と表すことができる。

光周波数コムはモード同期レーザーを発振器として f_{rep} 、 f_{ceo} を制御することで得られる。

2.2 非線形増幅ループミラー

モード同期を得るためには強度に依存した損失を与える必要がある。光パルス内で強度の大きい部分には小さな損失、小さな部分には大きな損失を与えることによりパルス幅が小さくなる。このパルスが共振器内を往復することで短パルス化し、モード同期を得ることができる。強度依存の損失を与える方法に過飽和吸収体、非線形偏波回転、非線形増幅ループミラーがある。

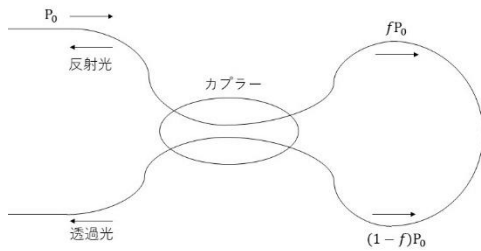


図 2.NALM の構成

非線形増幅ループミラー(Nonlinear Amplifying Loop Mirror : NALM)とは透過するミラーの透過率が強度に依存する特性を利用してカプラーを光スイッチとするシステムである。ファイバーループミラーの反射率はカプラーの分岐率に依存している。時計回りと反時計回りに分岐された光が1周した際に位相シフトを受け、その後にカプラーで干渉させる。入射パワー P_0 のうち f だけが時計回りに伝播するとき、長さ L のループの透過率 T_m は以下ようになる[3]。

$$T_m = 1 - 2f(1-f)\{1 + \cos[(1-2f)\gamma P_0 L]\} \quad (5)$$
ここで、 γ は非線形係数である。パワーが高い場合、非線形シフトにより、以下の式(6)を満

たすときに完全に透過される。

$$|1 - 2f|\gamma P_0 L = (2m - 1)\pi \quad (6)$$

m は整数である。これは高い透過率と低い透過率を周期的にとるが、スイッチとして用いるときには最小の強度を用いたいので $m = 1$ を用いる。しかし、 $m = 1$ の時はパワーがとても高い。強度を小さくするためにはループを長くすることで減少させることができるが式(6)で無視していたファイバー損失、GVD等を考えなければならない。そこで利得媒質をループ内で非対称的に配置することで解決できる。カプラーの直後に利得媒質を用いることで、時計回り、反時計周りでのループそれぞれの強度が異なることにより、2つの波の位相シフトが大きくなる。これによりスイッチに必要な光パワーのしきい値は小さくなる

3. Figure-8 の作成

本実験の目標は衛星搭載用の光周波数コムを作成するにあたって求められている堅牢性、低位相雑音特性を満たすための設計を行った。

まず、堅牢性を満たすために構成されるファイバーはすべて偏光を用いない偏波保持ファイバーを用いた。過飽和吸収機構としてNALMを選択した。過飽和吸収体は経年劣化があり、非線形偏波回転は偏光を用いているのでNALMが適していると判断した。

低位相雑音特性を満たすためにソリトン領域と比較し位相雑音が小さいストレッチパルス領域での発振を目標とした。共振器の設計をするにあたり分散値を計算した。正常分散ファイバーであるPM EDF 80dB/m 0.8 mの分散 $D = -1.29 \times 10^{-2}$ ps/nm、PM EDF 7dB/m 1.15 mの分散 $D = -3.22 \times 10^{-2}$ ps/nmである。異常分散ファイバーであるPM SMF 1550 nm

2.4 m の分散 $D= 4.32 \times 10^{-2}$ ps/nm となった。共振器全体の分散は $D=-0.19 \times 10^{-2}$ ps/nm となったことからストレッチパルス領域での発振をすることができると見込まれた。

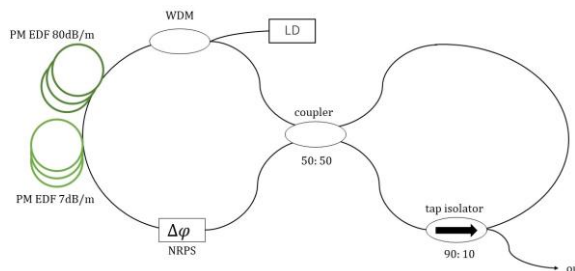


図 3. Figure-8 の構成

NALM を用いた Figure-8 型モードロックレーザーの構成を図 3 に示す。利得媒質である EDF(Erbium-doped Fiber) を中心波長 976nm の半導体レーザーで WDM(Wavelength Division Multiplexers) にカップリングすることにより後方励起をした。NALM には非相反位相シフタ (NRPS : Nonreciprocal Phase Shifter) を用いた。モード同期を起こすためには時計回り、反時計回りで位相が π 異なるようにしなければならない[2]。解決策として SMF を挿入し共振器長を伸ばせばよいが、挿入することにより繰り返し周波数が小さくなってしまう。NRPS は共振器長を変えずに非相反位相シフトを与えることができる。

設計したように融着し、得られた光スペクトルと時間波形を以下の図 4、図 5 に示す。得られた光スペクトルの概形からストレッチパルス領域での発振が確認された。半値全幅は 36.576nm と光周波数コムを作成する上で十分なスペクトルの広がりを得ることができた。くり返し周波数は 55.55MHz であり、要求である 50MHz 付近であった。

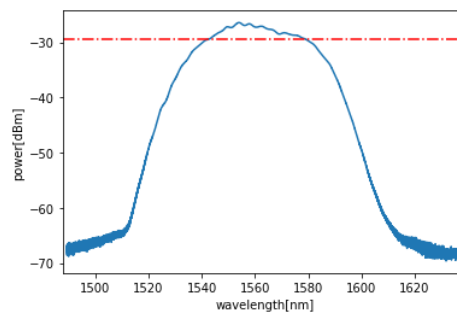


図 4. 光スペクトル

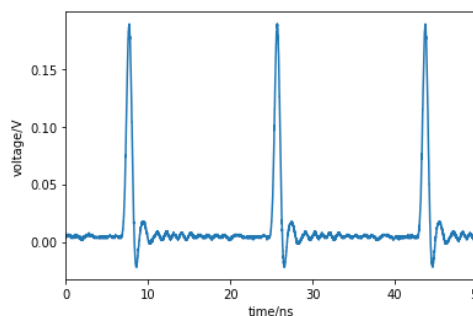


図 5. 時間波形

4. 小型 PZT の応答特性

f_{rep} は共振器長に依存している。そこで共振器長を制御するために小型の圧電素子を用いて制御を行った。まず、小型 PZT を共振器に組み込むにあたり、A:ファイバーと PZT、B:PZT と Base、C:ファイバーと Base のそれぞれでの接着について考えた。

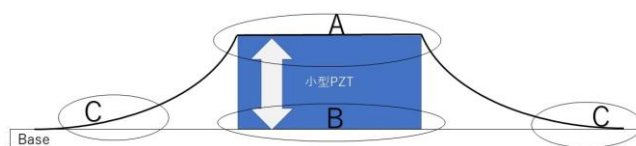


図 6. 小型 PZT の付け方

実験系は以下の図 7 のような構成で実験を行った。まず ECLD の光を 2 手に分ける。片方はあらかじめドラム型 PZT を用いて共振器長をロックしている。もう一方を小型 PZT によって制御を行った。小型 PZT が伸び縮みをすることで共振器長が変わり、カブ

ラーでの干渉の明暗が変化する。フォトディテクターで差動受光し、電圧に変換する。共振器長の変化に比例する電圧を入力した電圧と比較することで制御帯域がわかる。小型PZTの共振周波数が540kHzであることから本実験の目標の制御帯域は100kHz以上とした。

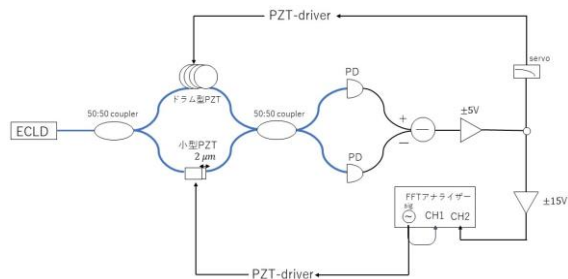


図7.小型PZTの応答特性の実験系

Baseにガラスを用いて実験を行った。A:アロンアルファ、B:アロンアルファ、C:粘土で測定を行ったところ、結果は図8のようになった。さらに、A:エポキシ、B:エポキシ、C:粘土を用いた結果は図9のようになった。

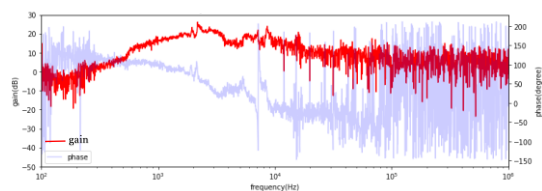


図8.A:アロンアルファ、Bアロンアルファ、C:粘土の測定結果

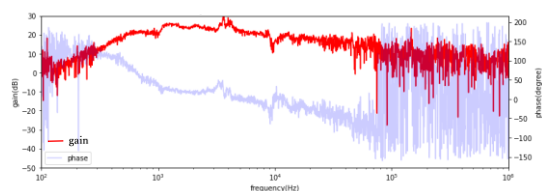


図9 A:エポキシ、B エポキシ、C:粘土の測定結果

まず、A:アロンアルファ、B:アロンアルフ

ア、C:粘土での測定結果は7kHz付近で位相が回り、10kHz以降でほとんど応答をしていなかった。次に。A:エポキシ、B:エポキシ、C:粘土での測定結果は70kHz付近まで制御帯域を得ることができた。このことから用いる接着剤は固く固まる方が制御帯域をえられることが分かった。しかし、目標であった100kHzは達成することができなかった。

5. まとめと今後の展望

Figure-8の作成に関してはストレッチパルス領域での発振が見られ、繰り返し周波数は目標に近い値が得られた。今後の展望として光周波数コム作成のため、 f_{ceo} の取得を目標とする。小型PZTの応答特性に関しては制御帯域を70kHzまで得ることができた。今後の展望として、ほかのBase、止め方、接着剤を用いて実験を行い目標値を達成する。達成後は実際に共振器に組み込み制御を行う。

6. 参考文献

- [1] Scott A. Diddams, David J. Jones, Jun Ye, Steven T. Cundiff, and John L. Hall “Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb” Physical Review letters. 84 (2000) 5102-5105
- [2] 松阪佳奈 “人工衛星搭載に向けた項安定光周波数コムの開発” 平成30年電気通信大学
- [3] G.P.アグラワール、小田垣考、山田興一 『非線形ファイバー光学』 (2004)吉岡書店