

ファイバー光周波数コム製作

植田研究室 北村俊幸

1. 序論

2000年頃、初めてTi:Sapphireレーザーとフォトニック結晶ファイバを組み合わせた自己参照法による絶対周波数決定が可能になった。このことにより、光周波数コムは精密な周波数の測定をMHzからTHzに拡張することができた。

ただ、Ti:Sapphireレーザーは装置が大きく、保守点検が難しく、更に長期運転が難しいという特徴があった。そこで我々は装置がコンパクトでメンテナンスフリー、長期安定な、オールファイバーの周波数コムを作成することを目的とし、製作を行った。

2. 原理

モード同期されたレーザーから出た光を周波数軸上で見ると、等間隔に並んだ縦モードが観測される。この並んだ縦モードが櫛のように見えることから、光周波数コムと呼ばれる。縦モード間隔を f_{rep} とし、周波数軸上で仮想的に縦モードを0に近づけて行くと、縦モードは0と重ならない。この余りの周波数はキャリアエンベロップオフセット周波数と呼ばれ、 f_{ceo} で表される。その際、 n 番目の縦モードの周波数は $f_n = f_{ceo} + n \cdot f_{rep}$ で表され、 f_{rep} と f_{ceo} を周波数基準等に同期させると、 f_n を決定することができる。

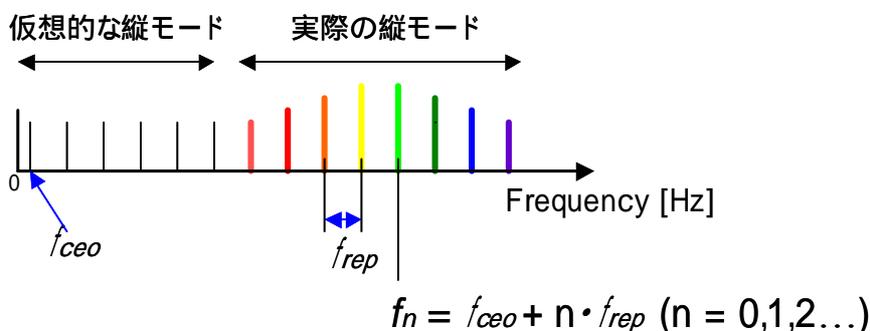


図 1 光周波数コム概念図

ここで、縦モード間隔 f_{rep} はビート信号として容易に観測可能であるが、キャリアエンベロップオフセット周波数 f_{ceo} は通常、観測出来ない。そこで、 f_{ceo} 観測のために自己参照法という方法が考え出された。

3. 自己参照法

非線形効果が起こるに十分なパワーの光を高非線形ファイバに入射すると、スペクトルが拡大する。その際、スペクトルを1オクターブ以上上げ、長波長側の第二高調波を発生させると、基本波と第二高調波が重なる部分が出てくる。基本波と第二高調波が重なった部分のビート信号は $f_{beat} = 2 \cdot (f_{ceo} + n \cdot f_{rep}) - (f_{ceo} + n \cdot f_{rep}) = f_{ceo} + (2n - n) \cdot f_{rep}$ で

表される。ここで、 f_{rep} が 0 になる信号を観測すれば、 f_{ceo} が求められる。

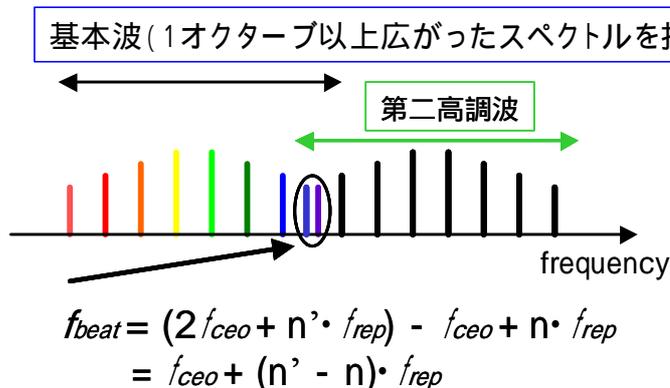


図 2 自己参照法の概念図

4. 実験

図 3 に実験図を示す。Er³⁺添加ファイバを用いたモード同期レーザーを製作後、Er³⁺添加ファイバを用いた増幅器の製作、高非線形ファイバを用いたスペクトルの拡大、最終的に自己参照法を用いた f_{ceo} の観測を行った。以下、順に説明をする。

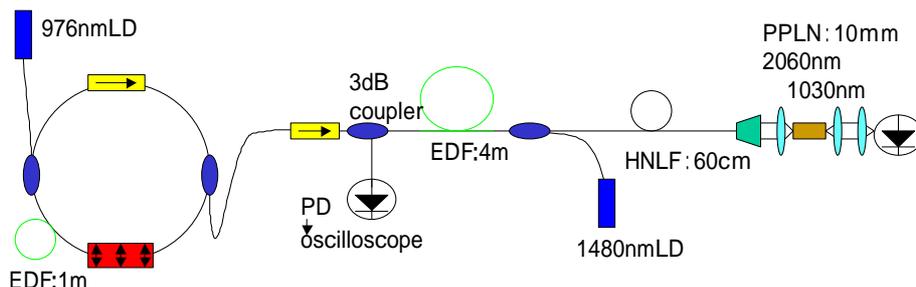


図 3 実験図

4-1. Er³⁺添加ファイバを用いたモード同期レーザーの製作

最初に非線形偏光ファイバを用いたモード同期レーザーを作成した。装置図は図 4 に示す。

波長 976nm の LD で励起されたエルビウムファイバは中心波長 1.5 μm の光を発生させる。発生した光はリング型共振器内を片方向に回転し、Output coupler からパワーの 10% が取り出される。リング型共振器内ではアイソレーター内の偏光板が、通過した光の偏光状態を直線偏光に変える。共振器を構成するファイバは非偏波保持ファイバなので、共振器内を移動するにつれ、そのパワーに応じて偏光が回転する。その際、共振器の下部に置いた偏光板を調整し、強度の大きい光のみを取り出し、強度の弱い光をシャットダウンする。つまり、共振器内で強度依存の損失変調を起こすことにより、モード同期が達成される。

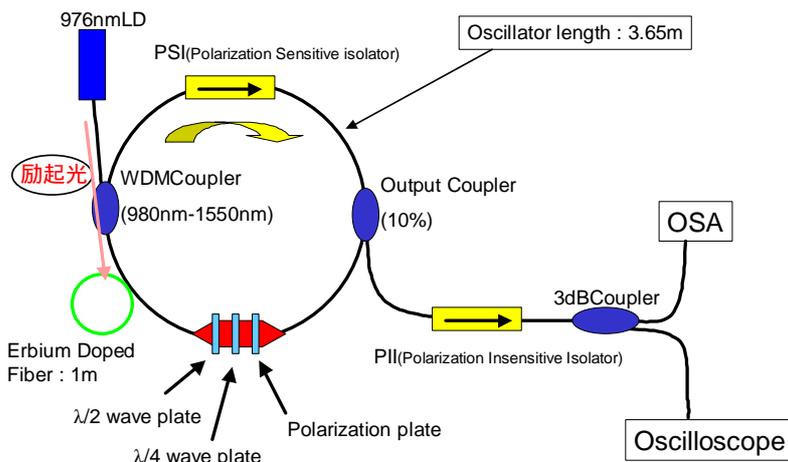


図 4 ファイバーモード同期レーザー

結果は図 5、図 6、図 7 に示す。スペクトルの半値全幅 17.5nm、フーリエ限界パルス幅が 464fs の超短パルスが発生し、パルス間隔は 54.7MHz であった。また、 f_{rep} のビート信号も観測された。

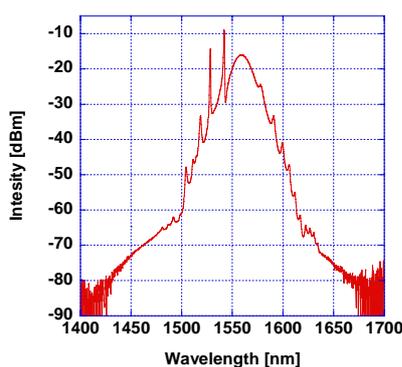


図 5 モード同期レーザーのスペクトル

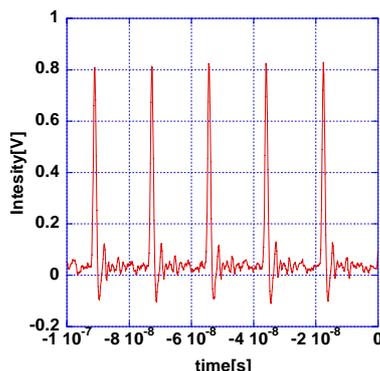


図 6 モード同期レーザーのパルス波形

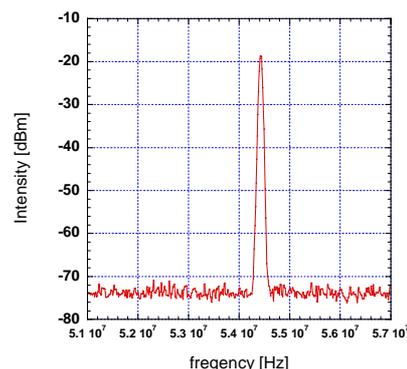


図 7 モード同期レーザーから出た f_{rep} のビート信号

4-2. Er^{3+} 添加ファイバを用いた増幅器の製作

モード同期レーザーから出た光は、非線形効果を用いたスペクトルの拡大に十分なパワーを持っていない。よって、レーザーから出てきた後に増幅を行う。

図 8 に装置図を示す。出てきた光は増幅され、最大でアベラージュパワーは 35 mW を達成した。これは非線形効果を用いたスペクトルの拡大に十分なパワーを持つ。

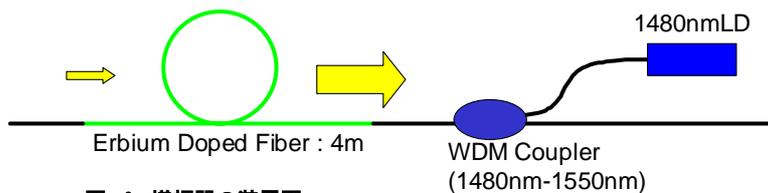


図 8 増幅器の装置図

4-3. 高非線形ファイバを用いたスペクトルの拡大

増幅器から出てきた光を高非線形ファイバに入射すると、4つの非線形効果（自己位相

変調、交差位相変調、誘導ラマン散乱、四光波混合)により、スペクトルが拡大する。その際、十分にパワーが強ければスペクトルが1オクターブ拡大する。

今回、実験では2種類の高非線形ファイバを用いた。それぞれ、ゼロ分散波長が1450nmと1549nmである。

結果は図9、図10に示した。どちらも1オクターブ以上スペクトルが広がった。今回の実験では第二高調波を発生させる2μm付近の光と基本波1μm付近の光の強度が高い方がよいので、ゼロ分散波長を1450nmにシフトした高非線形ファイバを使用した。

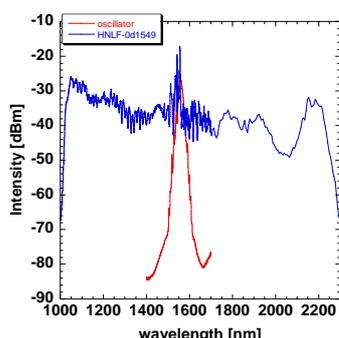


図 9 ゼロ分散波長1549nmのスペクトル

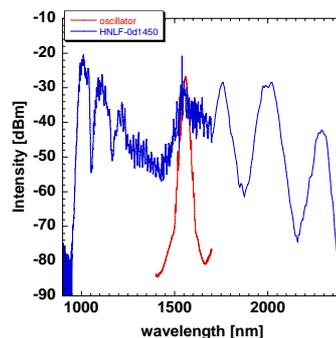


図 10 ゼロ分散波長1450nmのスペクトル

4-4.自己参照法を用いた f_{ceo} の観測

スペクトルが1オクターブ以上拡大した光を第二高調波を発生させる非線形光学結晶に入射し、 f_{ceo} の観測をおこなった。実験系は図11、結果は図12に示した。

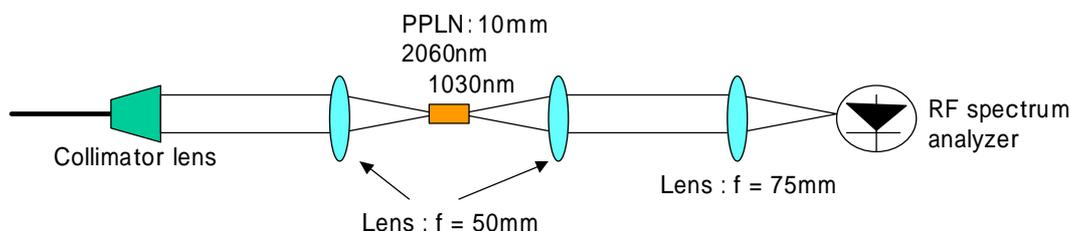


図 11 非線形光学結晶に入射時の実験系

5. まとめ

高非線形ファイバによるスペクトルの1オクターブ以上の拡大と、自己参照法によるキャリアエンベロップオフセット周波数の観測に成功した。ただし、S/Nが悪いので、 f_{ceo} を他の周波数基準に同期することができない。そこで、今後はS/Nを30dB以上にし、他の周波数基準に同期させ、精密な周波数測定を可能にすることを目標とする。

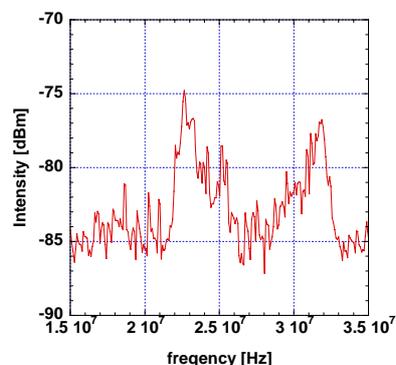


図 12 f_{ceo} のビート信号