# ファイバー光周波数コムの開発

## 植田研究室 北村俊幸

### 1. 研究背景

モード同期レーザーから出射された超短パルス光の非常に高いピークパワーにより、その光を 非線形媒質に入射すると、非線形現象により出射後の光のスペクトル帯域が1オクターブ以上拡 大される。モード同期されたレーザーは周波数間隔が一定の縦モードを持ち、その間隔を繰り返 し周波数(frep)と呼ぶ。また、縦モードの周波数を仮想的に0まで拡張すると、0と重ならない 余りの周波数、キャリアエンベロープオフセット周波数(feeo)を持つ。スペクトルが1オクタ ーブ以上拡大した超広帯域光(スーパーコンティニュアム光)の第二高調波をとり、元の基本波 と重ねると、従来では観測が難しかった feeoを検出することが可能になる。さらに frep と feeoを それぞれマイクロ波基準に同期をさせることにより、光の周波数を高い精度まで確定できる。 我々はファイバレーザーを用いて、産総研で開発された光周波数コム[1]を作成し、光周波数基 準伝送を行うための開発を行ってきた。超高安定な光周波数基準に光周波数コムの縦モードー本 とキャリアエンベロープオフセット周波数に位相同期を掛けると、全ての縦モードが超高安定な 光周波数基準となる(Fig.1)。



Fig.1 光周波数コムの概念図

我々は、安定化した光周波数コムを学内外へ光周波数基準伝送を行うことを研究の目的として いる。

### 2. 研究の概要

我々が以前行った光周波数基準伝送実験では、位相安定化ファイバにより、1秒で10<sup>-15</sup>の安 定度を保ったまま光を伝送できることが実証されている。

そこで同程度の安定度を持つ基準を作ろうと考え、光周波数コムを作成することにした。まず 我々は光周波数コム部を作成し、次に基準として1秒で10<sup>-15</sup>の安定度を持つ超狭線幅の安定化 光源を開発する。それぞれが完成した所で、*fcooと frep*をマイクロ波基準(ルビジウム原子時計) と超狭線幅の安定化光源にそれぞれ位相同期をかけ、安定化を行い光周波数基準伝送が行うこと を目標に実験を行った。

# 3. 光周波数コムの開発

光コムは中心波長 1.55 μ m のエルビウム添加ファイバーモード同期レーザーで発生させる。 このレーザーは長さ 3.65 m のリング型共振器で、非線形偏光回転を用いてモード同期をさせる。 共振器の構造を以下の図(Fig.1)に示す。





Fig. 3 超短パルスレーザーのスペクトル

また、繰り返し周波数は 54MHz である。Er ドープファイバの長さは 2.2m で共振器全体の群 速度分散の値を正にすることでストレッチパルスレーザーとして動作をさせている(Fig.1)。これ により変調不安定性による *fceo* の線幅の広がりを抑えることができる。

発振器から出てきたパルスのスペクトルを、増幅器によって増幅し、高非線形ファイバを用いて1オクターブ以上(950nm~2200nm)拡大し第二高調波を発生させることにより fceo を計測することができた。装置の概略図、計測した fceo をそれぞれ Fig.4 、Fig.5 に示す。



Fig. 5 fceo のスペクトル

計測した  $f_{ceo}$ は S/N30dB、線幅 400kHz 程度であった。次に我々は実際に  $f_{ceo}$ と  $f_{rep}$ が安定化 できるかどうか実験を行った。まず我々は  $f_{rep}$ を、ファイバを巻きつけた PZT をコントロール することにより  $f_{rep}$ の安定化を試みた。結果を Fig.6 、Fig.7 、Fig.8 に示す。



Fig. 6 非ロック時とロック時の周波数の変化



Fig. 7 安定化した際の frepの変動



ロック時には周波数が Hz レベルで全く変動しないことが分かる。また、実際に精度を上げて周 波数変化を測定したところmHz 程度の周波数変化が観測された。ここで frepの安定化ができる ことがわかり、今後 fceoの安定化を行うことを目標にしている。

### 4. 超狭線幅光源の開発

また我々は同時にマイクロ波基準の開発を行った。基準には、外乱の影響を抑圧した超高フィネスのファブリ・ペロー型共振器を周波数基準として安定化させた中心波長 1.55 µ m のレーザーを用いる。ファブリ・ペロー型共振器は Finesse が 500000、共振器長が 10 c m、スペーサは ULE ガラスセラミックスを使用している[2](Fig.9)。光源には ECLD を使用し、 共振器にパウンド・ドレバー・ホール (PDH) 法を用いて位相同期をかけることにより安定化を行った。(Fig.10、Fig.11)



Fig. 9 実際の F.P.共振器







Fig. 11 安定化した ECLD の周波数雑音スペクトル

また、我々は共振器への外乱低減のため、振動による鏡の距離変動が相殺される位置(Airy Point)を求めた。ECLDを軽く安定化した後、加振機によって特定の周波数振動を加え、周波数雑音スペクトルに現れた振動のピークにより、伝達関数を求める。また支持点の位置をかえることにより、Airy Pointを特定した(Fig.12)。実験の結果、Airy Pointは 20mm 付近にあることが判明した。



Fig. 12 安定化した ECLD の周波数雑音スペクトル

## 5. まとめと今後の展望

我々は光周波数コムを作成し、*fceo*と*frep*を計測し、*frep*の安定化を行った。また、光周波数基 準としての超高フィネスファブリー・ペロー共振器に PDH 法を用いて位相同期をかけ、安定 化を行った。今後は *fceo*の安定化を行い、共振器を外乱に強くした超狭線幅光源の開発をし、超 狭線幅の光周波数コムを作成する。

### 参考文献

[1] Hajime Inaba et al., "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb" Opt. Express, 12, 5223, (2006)
[2] S. A. Webster, et al. "Vibration insensitive optical cavity" Phys. Rev. A, 75, 011801, (2007)

# 発表

・<u>○北村 俊幸</u>,武者 満,中川 賢一,植田 憲一, "光コムを用いた光周波数基準の開発," 秋季第 71回応用物理学会学術講演会, 14p-ZL-9, 2010 年 9 月.

・<u>○北村 俊幸</u>,長久 敦史,武者 満,中川 賢一,植田 憲一, "光共振器を用いた超狭線幅レ ーザーの開発,"レーザー学会学術講演会第 31 年次大会,10pⅦ-5,2011 年 1 月.

・<u>○北村 俊幸</u>,長久 敦史,武者 満,中川 賢一,植田 憲一, "光コムを用いた光周波数基準の開発Ⅱ," 秋季第 72 回応用物理学会学講演会,山形大学,2011 年 8-9 月.