ファイバーコムを用いた精密分光システムの開発

レーザー新世代研究センター 武者研究室 上原正典

1. 研究背景と目的

分子運動を理解するためには、電子と原子核の 振動運動や回転運動を理解することが必須であ る。観測できる運動の状態は周波数帯域によって 異なっており、可視領域から紫外領域では電子運 動、赤外領域から RF 領域では振動運動と回転運 動が観測できる。電子や原子核の自転に相当する 自由度をそれぞれ電子スピン角運動量、核スピン 運動量と呼ぶ。これらの自由度は他の自由度と結 合して様々な相互作用を引き起こす。微細構造や 超微細構造と呼ばれるスペクトル線の分裂がそ れらの例であり、分子の回転状態を知るだけなく、 原子核の様子を調べるための貴重な観測対象と なる。

周波数安定化や高精度信号伝送などの研究を 実施してきた我々は、絶対周波数が確定した光コ ムの特性に着目し、周波数基準の開発研究を行っ てきた。とくに、長距離ファイバー伝送や長期安 定動作に優れている光ファイバーを使用して、フ ァイバーコムの開発を進めている。ファイバーコ ムを周波数基準として、精密分光システムを構築 する。しかし、安定な赤外光源を直接作製するこ とは困難であるため、本研究ではその準備として 近赤外光源の開発を試みる。すなわち、光周波数 コムを利用した近赤外分光システムの構築が本 研究の目的である。光コムの共振器は、産業技術 総合研究所で開発された 1.5 µm 帯のファイバ 一型光コムを参考にして構築する。対象分子は CO_2 、HCN、 C_2H_2 等があるが、 $1.55 \mu m$ 付近 に吸収線が集中する HCN を選択した。

2. デュアルコム分光の原理

光コムを分光に応用するには、その広帯域で高 角度の性質を十分に活用しなければならない。し かし、光領域のスペクトル情報から周波数情報を 直接所得することは非常に困難である。そこで、 高周波の信号を低周波領域に圧縮する簡便な方 法として、デュアルコム分光が発明された。これ はフーリエ変換分光の一種である。その概念図を 図1に示す。二台のコムの f_{ren} は周波数差 Δf だ け異なっている。一方のコムをシグナルコムとし て測定対象に照射し、もう一方のローカルコムを 使ってシグナルコムとのビートスペクトルを取 る。ビートはシグナルコムが得た吸収特性を含ん だものであり、そのまま検出器に挿入して分光測 定の結果として用いる。つまり、二台のコムのビ ートを取ることで、光領域の測定結果を低周波数 領域に圧縮表示させたものと理解できる。これに よって、測定結果からの周波数情報の取得が容易 になり、ワンショットでの高確度、高分解能のコ ム分光が可能となる。このとき、吸収特性は一台 のコムによって取得しているため、デュアルコム 分光の測定分解能は f_{rep} に依存する。



図1:デュアルコム分光の概念図

また、デュアルコム分光のダイナミックレンジ はビート発生の重なりによって限定されるため、 式(1)で定義できる。

$$f_{dyn} = \frac{f_{rep}^2}{2\Delta f} \qquad \cdots (1)$$

そのため、ダイナミックレンジを拡大するために、 Δf ができるだけ小さい二台のコムの開発が要求 される。

- 3. ファイバーコムの開発
- 3.1 二台のモード同期レーザーの開発



図2:固定コムの共振器

ダイナミックレンジを任意で設定するために、共 振器長が固定された固定コムと共振器長を任意 調節できる可変コムをそれぞれ製作した。

ファイバーコムの共振器構造を図2に示す。全 ファイバーで構築されたリング型共振器 EDF(Erbium doped fiber)を利得媒質としてお り、中心波長976 nmのLD(Laser Diode)でEDF をコア励起し、中心波長1550 nmで発振させて いる。さらに、EDF は円筒型PZT素子に強く巻 き付けられており、PZT素子を伸縮させること で共振器長を変えて、 f_{rep} を制御する。偏光子、 1/2 波長版、1/4 波長版の角度を調節することに よって非線形偏波回転モード同期発振させてい る。固定コムをモード同期発振させた際の平均パ ワーはおよそ7 mWで、スペクトルの半値全幅 は74 nm、パルス間隔は18 ns であった。





図5: delay line の写真

可変コムも固定コムと同じ共振器構造である。 しかし、共振器長を大きく且つ細かく調節する機 構を取り入れるために、自由空間光学系を設けて いる。この自由空間光学系は固定コムで利用して いる偏光調節器に delay line を追加した機器で ある。図5にその実際の写真を示す。delay line は10 μ mの精度で最大10 cm 調節できるため、 f_{rep} は分解能 100 Hz で最大 1 MHz 調節が可能 である。ただし、delay line は自由空間光学系で あるため、共振器のパワー損失がおよそ 10 %存 在する。



図7:可変コムのスペクトル図

3.2 frep の周波数安定化

 f_{rep} はファイバーから出射した光を PD(Photo detector)で受光して、モード間のビート信号と して f_{rep} を直接検出する。高安定なマイクロ波基 準を用意し、 f_{rep} との周波数差信号を共振器に巻 き付けた PZT 素子にフィードバックすることで、 f_{rep} と基準信号を一致させる。また、外乱抑制の ために断熱ボックスを設置して、長期安定動作の ために共振器を強固に固定した。その結果、位相 同期は1時間半以上の連続動作し。また、 f_{rep} の 安定度は基準信号と同等値まで達しており、積分 時間 100 秒で 10⁻¹²であった。これらは今後分光 測定に運用する上で支障はないと考えられる。



図8:ファイバーコムの光学系と電気系の全体図





 f_{ceo} は直接検出できないため、検出のための光 学系を別途用意する。用いた検出手法は自己参照 法である。まず、検出用に利用する光は EDFA でパワーを増幅し、HNLF (高非線形性分散シフ トファイバー@住友電気工業)で超広帯域光を発 生させる。発振スペクトルが1オクターブ以上広 げられた光はファイバーから自由空間に射出さ れ、バルク型の PPLN 結晶に照射して SHG を 発生させる。また、HNLF はコア中に添加され ているゲルマニウムを増やすことで、通常のファ イバーよりも光のコア閉じ込め率を強くしてい る。さらに、導波路構造を変化させることでゼロ 分散をシフトさせている。スペクトル幅の広帯域 化を引き起こしている誘導ラマン散乱や四波混 合が特に偏光依存性を有するため、EDFA の前 に配置している PC を操作して偏光を調節する。 PC はファイバー軸に対して垂直に応力を与え、 ねじる機構を有する。これは波長板や偏波保持フ ァイバーと同様の原理で、敢えて応力を与えたフ ァイバーをねじることで、波長板による偏光制御 と同じ効果を得ている。



図 11: 広帯域化されたスペクトル図

次に1オクターブ光を利用した f_{ceo} 検出を試 みた。 f_{ceo} 信号は1オクターブ広がった fundamental とそのSHGのビートを受光する ことで検出する。ファイバーより出射した fundamentalを1/2波長板、1/4波長板に入射し、 PPLN 結晶に入射する。二枚の波長板による偏 光制御は、PPLN 結晶が直線偏光に対してのみ 反応するためである。なお、SHGの発生効率は 約 30%以下である。

最初に、PPLN の前に Longpass Filter を配置 することで fundamental の低波長成分を排除し、 SHG のみのスペクトル波形を得た。図 12 に示 す通り、1050 nm で SHG と fundamental のが 重なっていることが確認できる。ビート検出の SN 比は干渉させる二つの光のパワーに依る。つ まり、 検出のために fundamental と SHG の双 方の十分な SN が必要である。しかし、HNLF による超広帯域光のスペクトル波形は日々異な るため、この一連の光学系はコムを起動させる度 にアラインメントする必要がある。今回は、SHG の SN 比が比較的高かった 1050 nm の波長域で 実施した。検出した*f_{ceo} ビート*信号を図 12、13 に示す。幾つかのピークが確認できるが、励起光 の出力変動に連動して信号が周波数シフトする ことで、 f_{ceo} 信号を識別できる。



図 12: fundamental と SHG のスペクトル図



図13の結果に対して、電気的に信号向上の措置 を施した結果を図に示す。ノイズフロアから数え ておよそ 30dB のビート信号を検出できた。これ は位相同期に利用する信号としては、SN の要求 を満たすものである。一方、高 SN 信号検出の再 現性は低い(翌日に実験を行っても高 SN 検出で きない。など)ため、長時間の位相同期に利用す ることは困難である。今後は、この ビート信号 を安定して 30 dB 以上検出できるように、光学 系や電気系を改善することが必須となってくる。



図 14:高 SN での *f*_{ceo} 信号の検出

4. デュアルコム分光の準備

4.1 ECLD を用いた HCN 分光

測定対象の HCN の吸収特性を調べるために、 ECLD (外部共振器型半導体レーザー)を利用し て HCN の線形吸収を測定した。その実験系を図 15 に示す。この ECLD はデュアルコム分光の際 にアラインメントに利用するものであるため、フ アイバーコムと同様の 1.5μm 帯の光源になる。 共振器に取り付けられた PZT 素子を制御するこ とで、ECLDの周波数を掃引する。図16がその 結果をまとめたものである。この結果を参考文献 ③の吸収線と照合したところ、R4-branch から P3-barnch まで同定できた。





図 15: ECLD による HCN 分光の全体光学系

4.2 デュアルコム分光光学系

式(1)に示したように、デュアルコム分光のダ イナミックレンジは二台のコムの繰り返し周波 数差 Δf に依存する。しかし、ビート発生はノイ ズに埋もれやすいため、実際にはダイナミックレ ンジ丁度の本数のデュアルコムビートは検出さ れない。したがって、デュアルコムビートの検出 SN を高める措置が必要になってくる。式(1)に示 す要素以外でビート検出に影響を及ぼすのは、そ れぞれのコムの線幅、SN、ビートの重ね合わせ などが挙げられる。コムの線幅は共振器の安定化 機構に依るものであり、共振器の強固な外乱抑制

(温度調節、振動抑制など)や超高安定な周波数 基準への位相同期などが考えられる。一方で、そ れぞれのコムの SN の向上と、ダイナミックレン ジ域外の信号を除去することは、ファイバーコム 共振器の出力後に小規模な光学系を用意するこ とで実施できる。以上を踏まえ、構築予定である デュアルコム分光の光学系を図 17 に示す。



図17:デュアルコム分光の光学系概要

光コムは広帯域にわたって発振スペクトルを 有するため、縦モードー本あたりのパワーは非常 に低い。そのため十分に高いパワーを要求する飽 和吸収分光は厳しいため線形吸収による分光を 実施する。二つのデュアルコムビート信号を用意 し、Reference と吸収プロファイルを取得した Signal の差を分光結果とする。観測帯域の光の みを取り出すために、回折格子とピンホールを利 用する。このときの波長選択のアラインメントに は、同軸で出射させた CW レーザーをガイド光 として利用する。これは 4.1 節の HCN 分光で利 用した ECLD である。また、分光のダイナミッ クレンジを広げるために、コムはそれぞれ EDFA で光増幅させる。

5. 結論と展望

今回の研究で、二台のファイバーコムを製作し、 デュアルコム分光の測定準備を実施した。ファイ バーコムの製作においては、二台の共振器の開発、 f_{rep} の長時間位相同期、 f_{ceo} の検出を達成した。 分光測定の準備においては、使用する測定対象の 吸収特性の確認やデュアルコム光学系の構築準 備を進めた。

今後取り組むべき課題は、 f_{ceo} の検出と安定化 の機構を完成させ、二台のコムを絶対周波数基準 として利用できるようにする。また、研究室で別 途開発中である超狭線幅光源に f_{rep} を位相同期 することで、ダイナミックレンジ拡大を図ってい く。 $f_{rep} \geq f_{ceo}$ の周波数安定化を一通り終えた時 点で、デュアルコム分光の実施に取りかかってい く。

参考文献

[1] Y. Nakajima, et.all, Opt. Comm. 281, 4484, (2008).

[2] W. C. Swann and S. L. Gilbert, J. Opt. Soc. Am. B19, 2461, (2002).

[3] William C. Swann and Sarah L. Gilbert, J. Opt. Soc.Am. B 22, 1749, (2005).

[4] C. Latrasse, et.all Opt. Lett. 15, 1885, (1994).

[5] 北村俊幸,平成 23 年度修士論文,電気通信大学,(2012).

[6] 長久敦史, 平成 24 年度修士論文, 電気通信大学, (2013).