

1.5 μm の3倍波を用いたヨウ素安定化光源

武者研究室 1610429 趙 叡讚

1. 研究背景

日本の上空を通る軌道を持つ人工衛星を複数組み合わせた衛星システムのことを準天頂衛星システムと呼ぶ。現在は次世代準天頂測位衛星システムの開発が行われており、特に我々の研究室では測位衛星の高精度化のために安定なマイクロ波の基準の開発について研究をしている。

現在、マイクロ波の基準として用いられている Rb (ルビジウム)原子時計はその安定度が 10^{-12} となっている。我々はこれよりさらに安定度の高い、 10^{-15} の安定度を持つ光周波数基準を開発している。さらに高い安定度を得るためにヨウ素の飽和吸収線を光周波数コムにロックをすることによって安定度の高い光領域の光をダウンコンバートし、そこからビート周波数を取って安定なマイクロ波を生成しようとしている。このことについて少し説明を加える。

ヨウ素の飽和吸収線とは飽和吸収分光から得られる吸収線である。ヨウ素分子に光を照射すると、ある速度成分を持つ分子のみ励起が起これ、その分子らが励起を仕切ってしまうと吸収しなくなり、光が透過する現象が起きる。この際に現れるのが飽和吸収線であり、後でヨウ素安定化レーザーの安定化に用いられる。飽和吸収線は自然固有のものであり、外乱に強く影響されにくいという特徴を持っている。

光周波数コムとは周波数軸上に並んだ縦モードであり、各々の縦モードの間隔は変化するが、その間隔だけは等しいというこ

とが保障されている。そのため前述の飽和吸収線と光周波数コムの縦モードを同期することで光周波数コムを安定に動作させることができる。光周波数コムの間隔は一定であるために、その間隔を検出するとビート周波数として現れる。そのビート周波数が今回目指している約 50MHz となっている。

つまり、数百テラヘルツの高安定な光の周波数安定度(ヨウ素によるもの)を保ったまま、マイクロ波が縦モード間のビートとして検出することができるのである。私はこのうち、周波数基準のためにヨウ素安定化レーザーについて研究を行っている。

2. 研究目的

これまでは宇宙重力波検出器計画(DECIGO計画)のために1030nmのFiber DFB Laserから第2次高調波515nmを生成し、ヨウ素の飽和吸収線にロックをかけて研究を進めてきた。しかし、ファイバーDFB Laserの1030nmの光は1.5 μm ECLDより変調周波数200kHz付近での強度雑音が大きく、線幅は太いという問題点がある。それに光周波数コムは1.5 μm を中心波長として広がっているため、Fiber DFB Laserでロックをかけてもそのビート周波数が弱い欠点がある。しかし、1.5 μm ECLDを用いた場合、THG結晶を用いれば515nmの光が生成され、これまでと同じヨウ素の飽和吸収線に同期できながら、光周波数コムの中心波長に近くビート信号が十分取れる利

点がある。このような理由から $1.5\ \mu\text{m}$ ECLD を用いることにした。

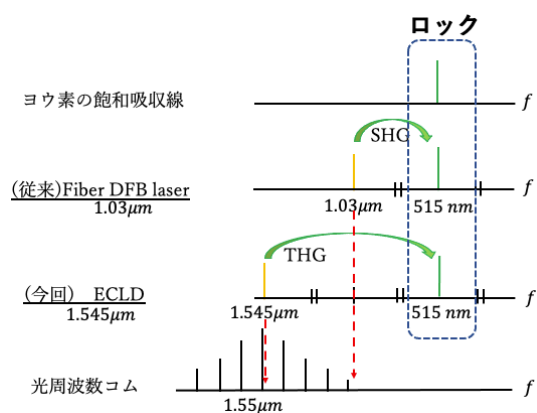


図 1. ECLD と Fiber DFB Laser の比較

本研究では中心波長 $1.545\ \mu\text{m}$ の市販(RIO社)の ECLD を用いた。この光源は導波路型外部共振器レーザーとして、平面導波路にブラック反射鏡が取り付けられているため、より細くノイズの少ないレーザーが発振されるようになっている。スペックシート上にもデータは書いてあるが、今後ヨウ素安定化レーザー研究に用いるために詳細なデータが必要であったため研究を行うことにした。

研究は $1.5\ \mu\text{m}$ ECLD の特性評価とその3倍波(515nm)の特性評価で大きく2項目に分けて行った。

3. $1.5\ \mu\text{m}$ ECLD の特性評価

光源の波長は温度で大きく変えることができる。そのため、2台の ECLD を用意し、それぞれ光源内部の温度を変えながら波長計を用いて測定を行った。全体的に波長は温度を上げるにつれてモードホッピングを繰り返しながら伸びていくことが分かる。最大同調範囲は2台とも 50GHz 以上で、モードホップなしで連続掃引可能範囲は

20GHz 以上取れている。図 2 に示している緑線が今回ヨウ素の飽和吸収線であり、モードホップをしないような温度設定が必要である。この実験結果はもし将来異なるヨウ素の飽和吸収線で研究を行う時に活用することができる。

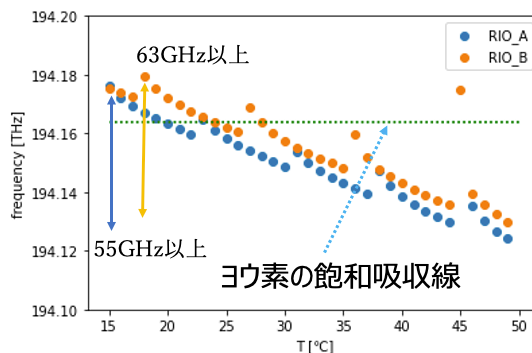


図 2. 温度による波長制御特性

次は $1.5\ \mu\text{m}$ ECLD の線幅の測定を行なった。線幅は周波数の短期安定度と関係のあるパラメータとして、レーザー周波数の揺れを表す。

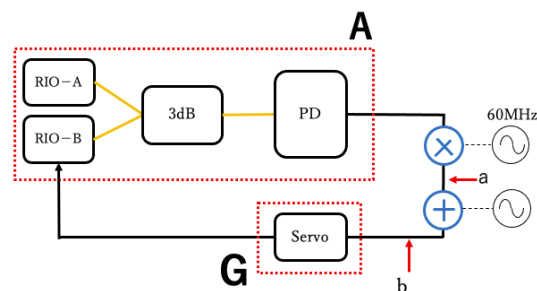


図 3. ECLD の特性測定的光学系

図 3 のように 2 台の ECLD を使い、光学系を組み、60MHz (任意に設定した値) にロックをかけて測定を行なった。その結果を図 4 に示す。

$1.5\ \mu\text{m}$ ECLD の場合、3 dB 線幅が 4 kHz 以下となり、Fiber DFB Laser よりも線幅が細いことが分かる。したがって、ECLD を用いた場合、短期周波数何程度の向上が期待される。

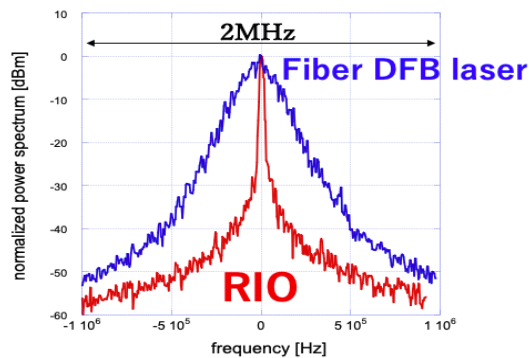


図 4. ビート周波数の比較

最後に ECLD の電圧制御特性について調べた。外部から電圧を与えることで中の半導体の電流が変えられ、周波数の制御が可能となるためである。図 3 で 2 台の RIO からビートを取り、60MHz の周波数にオフセットロックをかけた。

次にロックをした状態で、a のところに新たに信号を入れ、その Output の結果を OPEN LOOP で測定し、系全体の応答を測定した。

その結果、図 5 のような ECLD の周波数応答が得られた。緑線は位相、赤線は利得を表している。今度はこの周波数応答に基づいて、シミュレーションを行い、等価回路を組んだ。その結果を図 6 に示す。

今回 G の部分(Servo 部分)は我々が製作した回路のため、既知である。したがって、G を割ってあげることで ECLD の応答が分かるようになる。その結果を図 7 に示す。

今回用いた ECLD は 10kHz で 1 次、30kHz で 2 次の応答を持つことが示されている。

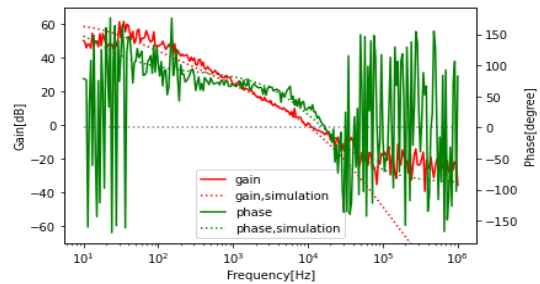


図 5. OPEN LOOP (G×A) の伝達関数測定

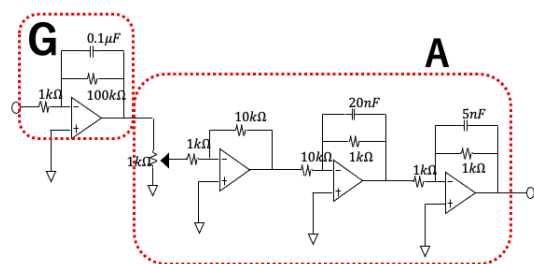


図 6. 図 5 の伝達特性を持つ等価回路

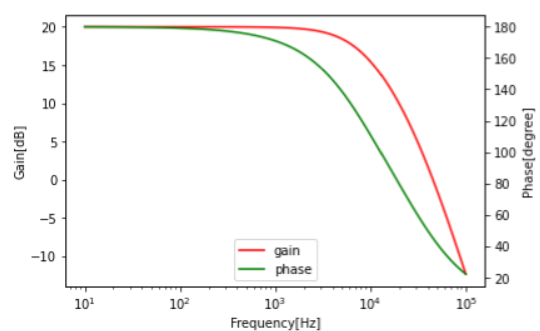


図 7. RIO (A 部分)の周波数応答

4. 1.5 μm ECLD の 3 倍波(515nm)の特性評価

1.5 μm ECLD に THG 結晶を用いて 3 倍波を出したが、結晶の構造から基本波と 2 倍波が混ざっていることが観測からわかった。3 倍波のみ必要のため、ダイクロイックミラー、ローパスフィルターおよびバンドパスフィルターを用いて図 8 のように他の成分をカットした。その結果、出力がどの程度変わってくるか、波長変換効率はど

ここまで得られるかなど測定を行う必要があった。

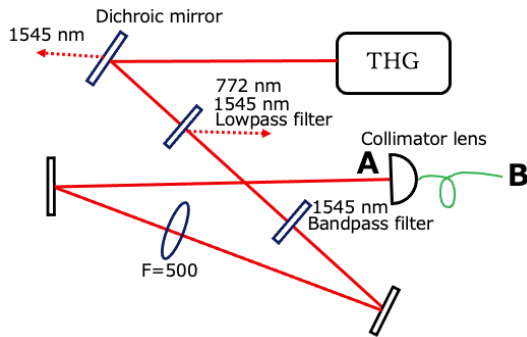


図 8. 3 倍波の測定光学系

測定結果から THG 結晶の温度より出力は図 9 で示すように sinc 関数のような振る舞いをする事が分かる。

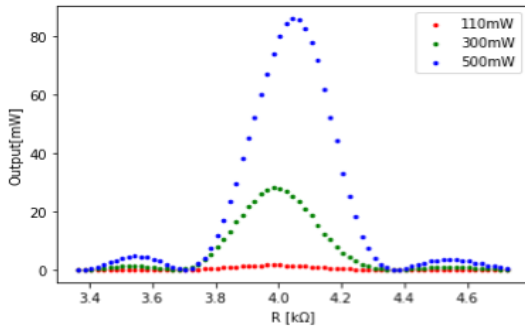


図 9. THG 結晶の温度整合

スペックシート上では 50.9°C 付近で最適な温度を持つと出ているが、入力パワーによって出力最適温度は 50.3°C まで下がることが分かる。THG 結晶を通して倍波を得るには温度制御に気を付けなければならない。(図 10)

最後に THG 結晶の構造は四角の導波路になっていたため、円形に整形して自由空間のヨウ素に照射する必要がある。また可搬にして作業するために、横モードを測定しシミュレーションを行なった。(図 11)

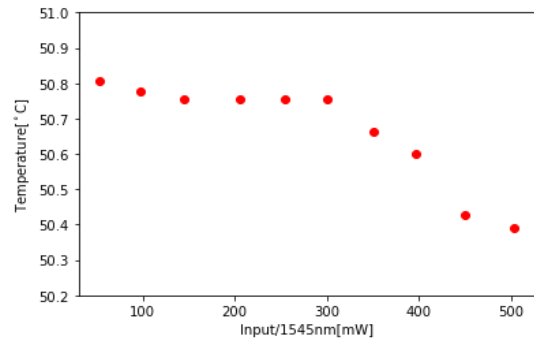


図 10. 入力パワー vs. 最適温度

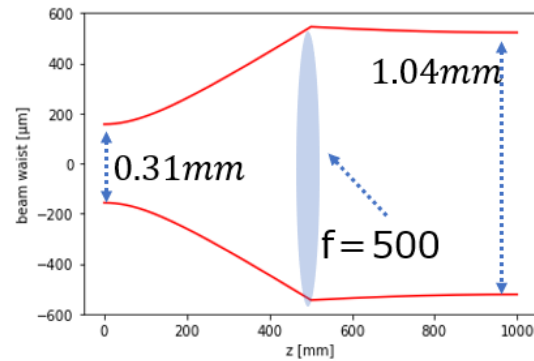


図 11. シミュレーション結果

この光線を使い、ヨウ素の飽和吸収線にロックをかけ得られた周波数弁別信号を図 12 に示す。

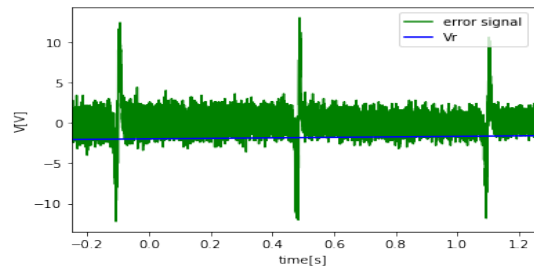


図 12. 3 倍波で得られた周波数弁別信号

4. まとめ

ヨウ素安定化レーザー開発のために先行研究として 1.5 μm ECLD を用いて ECLD と 3 倍波の特性について研究を行なった。その結果から、以前まで使ってきた同じヨウ素の飽和吸収線に同期することができた。今後は精度の高いヨウ素安定化レーザーの開発について研究をする予定である。