

ヨウ素安定化 1.5 μ m 光源の開発

武者研究室 藤田 悠生

1 研究背景

現行で測位衛星に周波数基準として搭載されているものは、Rb(ルビジウム) 原子時計である。Rb 原子時計からはマイクロ波周波数基準が得られて、その周波数ゆらぎは 10^{-12} オーダーである。ヨウ素の飽和吸収線を用いれば、これを 10^{-14} 以下にすることが可能である。

2 研究目的

本研究の目的は、準天頂衛星 (QZS) による位置情報計測システムの高精度化である。本研究室では、そのために光コムを用いた安定なマイクロ波を発生させる研究を行っており、その中のヨウ素安定化光源の開発部分が本研究のテーマになっている。これまで、ヨウ素安定化光源の光源部分には波長 1030nm の fiber DFB laser を用いてきたが、波長 1545nm の平面導波路外部共振器型レーザー (PW-ECL) に変更し、ヨウ素を用いた周波数安定化や光の強度安定化を行う。

3 THG 光源の開発

3.1 1.5 μ m 光源 (PW-ECL)

ヨウ素安定化光源の光源部分を Koheras 社製である波長 1030nm の fiber DFB laser から RIO 社製である波長 1545nm の PW-ECL に変更を行なった。変更の理由は、まず PW-ECL の方が狭線幅であるからである。これは、2 台の光源による beat 測定の実測結果 (図 1) より明らかであり、線幅が細いということはそれだけ周波数安定度が良いということである。

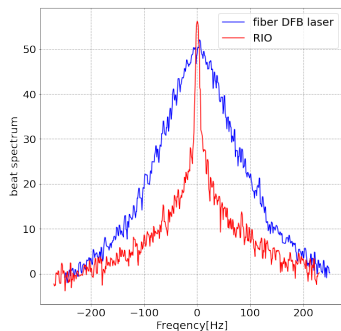


図 1: 光源の線幅比較

次に、200kHz での強度雑音が小さい事である。本研究では、ヨウ素による分光の際に光を 200kHz で変調するが、look in 検出による復調後に 200kHz 付近での雑音が大きいと一緒になって乗ってきてしまう。そのため、200kHz での強度雑音小さい事は大きな利点である。次に、光周波数コムと親和性が高い事である。これは、波長 1545nm が光周波数コムにおける中心波長に近いからで、安定なマイクロ波生成の際のビート測定が十分に行える。ここで、各波長での周波数対応を図 2 にまとめた。

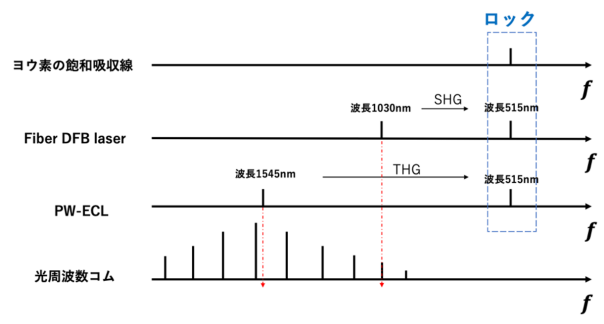


図 2: 各波長での周波数対応

また、PW-ECL は温度を変えることで波長を変えることができる。PW-ECL の温度波長特性を測定すると、図 3 のようにモードホップが見られた。

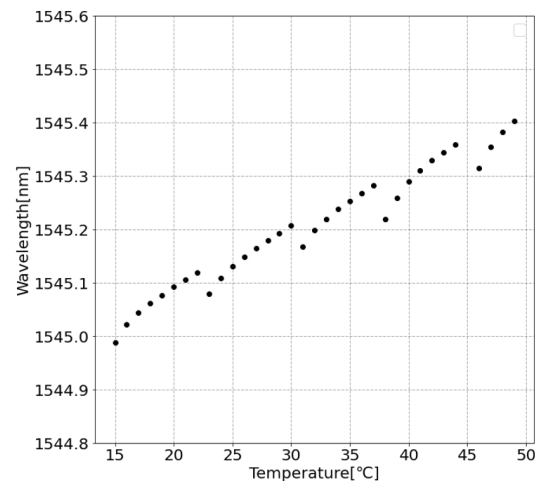


図 3: PW-ECL の波長温度特性

これまで周波数基準で使用していたヨウ素の飽和吸収線の波長は 515nm で, 波長 515nm は波長 1545nm 光源の 3 倍波にあたる. その波長 1545nm が安定領域になるように調整することで, 問題なく使えると判断した.

3.2 EDFA

光源 PW-ECL より出た波長 1545nm 光のパワーを増幅させる必要がある. これまでは, f-DFB laser から波長 1030nm 光が 10mW 出力され, イッテルビウム添加ファイバー増幅器 (YDFA) によって 200mW まで増幅し, 第 2 高調波発生 (SHG) によって波長 515nm 光が 40mW 出力された. そして今回は, PW-ECL から出た波長 1545nm 光が 10mW 出力されるがエルビウム添加ファイバー増幅器 (EDFA) によって増幅させて, 第 3 高調波発生 (THG) により波長 515nm 光をこれまでと同程度出力させる. ここで, THG 結晶の変換効率は 80%/W である事と, THG も SHG も導波路型結晶を使用しており, 元々変換効率は高いが THG は SHG に比べると変換効率は悪いという事を考えて 400mW の出力が出るような EDFA を設計した. 製作した EDFA (図 4) は, 高効率, 高出力のためコア励起の双方励起で構成され, 前方励起と後方励起はどちらも波長 975nm, 1W の半導体レーザー (LD) を使用した. EDF は, 55dB/m のものを 1.7m 使用した. また, 波長変換には s 偏光入力が必要のため PM ファイバーを使用した. WDM はどちらもハイパワー用である.

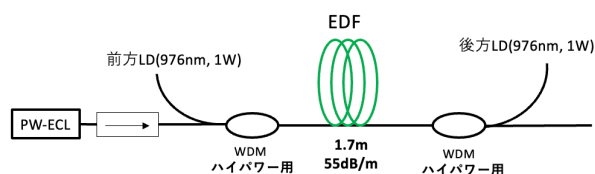


図 4: 製作した EDFA の構造

製作した EDFA の出力特性を測定した結果が図 5 であり, 前方励起 LD を最大出力で固定し後方励起 LD の電流ドライバーを変化させた際の様子である. そして, 最大で目標値である 400mW の出力を達成した.

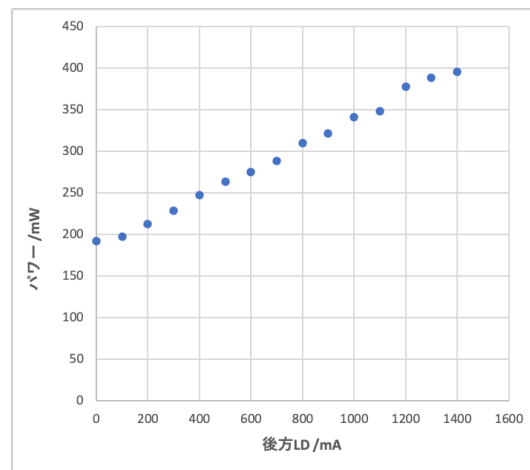


図 5: EDFA 出力特性

3.3 THG 光学系

EDFA によってパワーが増幅された波長 1545nm 光から THG によって 3 倍波である波長 515nm を取り出すために, 自由空間出射による THG 光学系を製作した (図 6).

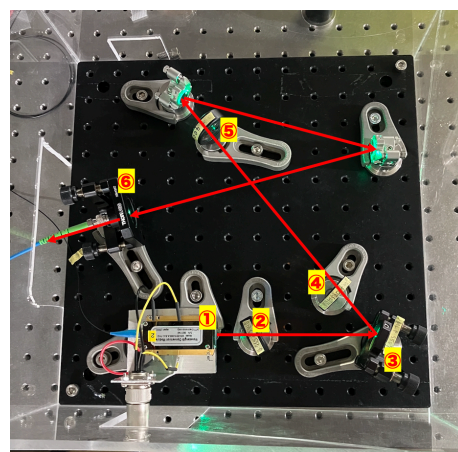


図 6: 製作した THG 光学系

図 6 において, EDFA から出た増幅された波長 1545nm 光は①のデュアルピッチ導波路型 PPLN (以下 THG 結晶) を通る. THG 結晶から出る光には 3 倍波の他に 2 倍波や基本波も含まれているため, フィルタを通す必要がある. そこで, ②のダイクロイックミラー (DMSP550) を通って③のロングパスダイクロイックミラー (DMLP550) で反射し, ④のバンドパスフィルタ (FBH520-40) を通って残った 515nm の光は, ⑤の集光レンズ (焦点距離 400mm) を通り, その後 2 つのミラーで反射され⑥のコリメートレンズ (TC06APC 532) に入射する. この時のカップリング効率は 72% であった.

以上より出力された TH 光は, 分光部へと入射する.

THG 結晶の温度整合を測定すると図 7 となった. ただし, 測定時には EDFA における出力を最大にした. そして, この結果を参考に最も出力パワーが大きくなるように THG 結晶の温度の値を設定した (最大出力約 37mW).

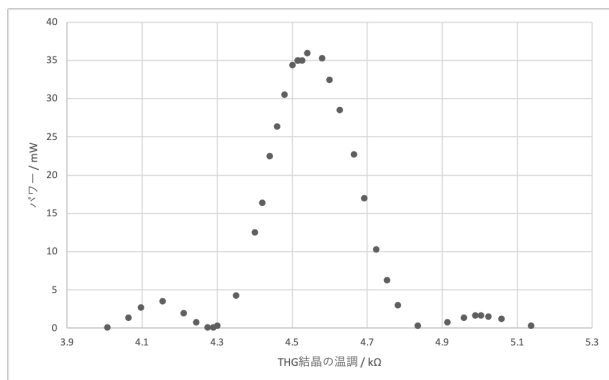


図 7: 使用した THG 結晶の温度整合

4 強度安定化

周波数安定度に強度安定度がカップリングしているという事実が測定されており, 光の強度安定化を行う必要がある. ここで, 光の強度安定化制御は分光部で行う. 分光部は, ブレッドボード上に組まれた自由空間光学系で構成される. そこでは, まず THG 光学系からの波長 515nm 光を PBS によって光を pump 光と signal 光に分ける. pump 光は, 電気光学変調器 (EOM) によって 200kHz での位相変調がなされてヨウ素セルへ入射する. 一方で, signal 光は, 干渉を防ぐために音響光学素子 (AOM) によって周波数シフトがなされてその 1 次光がヨウ素セルへ入射する. ヨウ素セル内では pump 光と signal 光が対向入射されており, 飽和吸収分光が行われる. また, 微分信号は変調移乗法が用いられている. ヨウ素セル内に入る前の pump 光と signal 光はそれぞれ一部が pick off されて強度安定化制御に用いられる.

4.1 制御回路設計

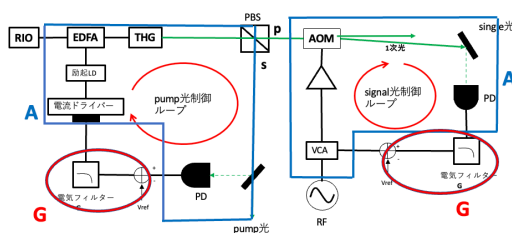


図 8: 強度安定化制御

図 8 において, まず pump 光を励起 LD 制御によって強度安定化のループを作る. この際に, 偏光がゆれることで PBS での分岐比が変わるため pump 光が安定したから signal 光が安定するとは限らない. そこで, signal 光も強度安定化させる必要がある. signal 光は, AOM の回折効率を変化させることで強度安定化のループを作る.

制御回路設計の手順は, 図 8 のシステム A の伝達関数を測定し, その結果を元にシステム A の等価回路を製作する. そして, その等価回路を元に電気フィルター G を製作する. そして最後に, AG の伝達関数 (Open Loop 伝達関数) の実測とシミュレーションをボード線図より比較する. AG の回路は pump 光側が図 9, signal 光側が図 10 となった.

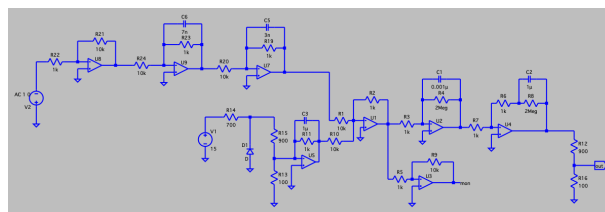


図 9: AG の回路 (pump 光側)

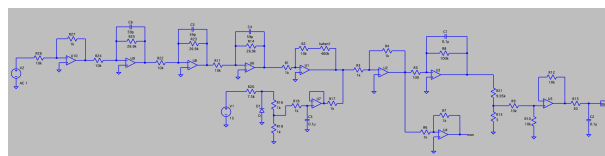


図 10: AG の回路 (signal 光側)

実測した AG と回路図 9, 10 をシミュレーションした結果を比較すると次のようになった. pump 光側が図 11, signal 光側が図 12 である.

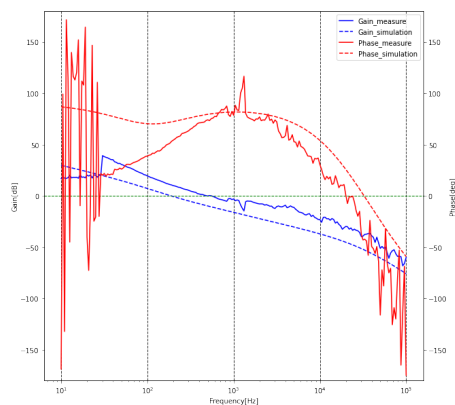


図 11: AG のシミュレーションと測定値の比較 (pump 光)

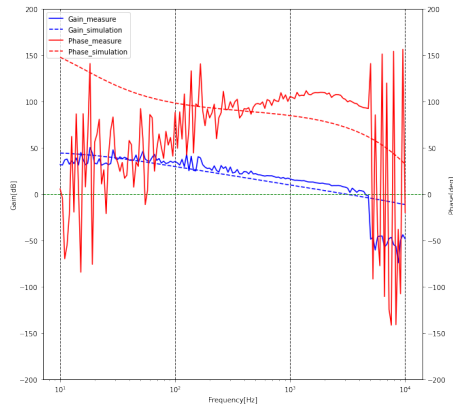


図 12: AG のシミュレーションと測定値の比較 (signal 光)

図 11, 図 12 のどちらも, 実線が実測, 点線がシミュレーションであり, 赤線が利得, 青線が位相である. 図 11 の UFG は 800Hz, 位相余裕は 80° である. 図 12 の UFG は 8000Hz, 位相余裕は 100° である. また, pump 光側の signal 光側のどちらも低域で利得が得られている.

4.2 問題点とその解決

強度安定化制御をかけると図 13 のように低い周波数ゆらぎが抑えられている. ただし, 縦軸は PD で受けた光のパワー, つまり光強度の揺れ具合を表してる.

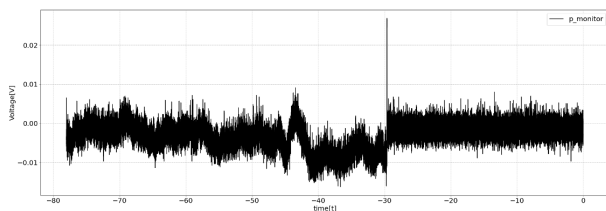


図 13: 強度安定化の様子

しかし, 観察していると制御中にバースト的なノイズが確認された. この問題の原因を調べた結果, EDFA 前方励起 LD から後方励起 LD へと戻り光が発生していることがわかった. これは, 前方励起 LD をオンとオフの 2 通りで後方励起 LD のパワーを手動で振った際に, オンの時にのみパルス的な挙動が確認されたためである (図 14).

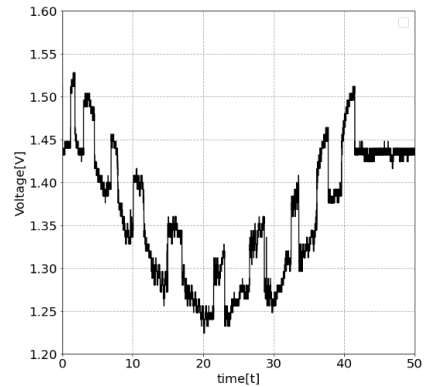


図 14: パルスの挙動 (前方励起オン)

この問題を解決するために片側励起の EDFA を製作した. 構造は図 15 である. 特長としては, パワーを出すために後方励起において二つの LD を PBC によって結合している点である. 用いた LD 等は図 4 と同じである.

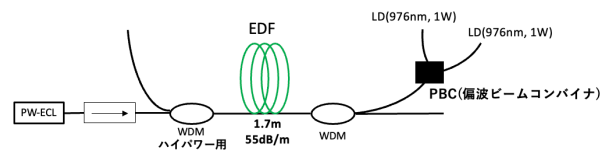


図 15: 作り直した EDFA

図 15 を用いることで問題点は解決された (図 16).

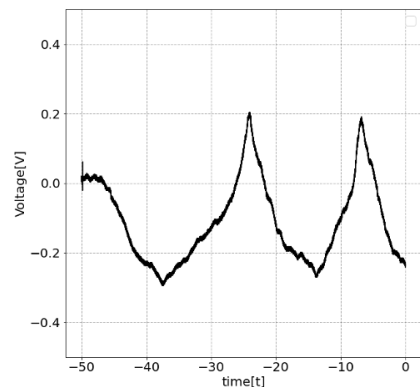


図 16: 図 14 が改善した結果

5 まとめ

ヨウ素安定化光源の光源を波長 1030nm の f-DFB laser から波長 1545nm の PW-ECL へ変更し, EDFA の製作, THG 光学系, 強度安定化制御のための回路設計を行なった. 今後の予定としては, 周波数安定化および強度安定化を行なった状態で 2 台の PW-ECL 同士の beat 計測をして, 線幅を見ることで周波数安定度を評価する.