

6.8GHz変調サイドバンドへの 光注入同期レーザーシステムの開発

量子・物質工学科 岸本研究室
0923001 石田知大

1.研究背景・目的

^{87}Rb の磁気光学トラップでは D2 線の $|5S_{1/2} F=2\rangle \rightarrow |5P_{3/2} F'=3\rangle$ に共鳴なクーリング光と冷却サイクルから外れた原子を $|5S_{1/2} F=2\rangle$ に戻すための $|5S_{1/2} F=1\rangle \rightarrow |5P_{3/2} F'=2\rangle$ に共鳴なりポンプ光の二本のレーザーが必要である。クーリング光(マスターレーザー) は外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を 780.25nm で発振させ、 ^{87}Rb の入った蒸気セルを透過させることによって $|5S_{1/2} F=2\rangle \rightarrow |5P_{3/2} F'=2-3\rangle$ の遷移にロックし、周波数を決定する(飽和吸収ロック)。その光をスレーブレーザーに光注入同期することで、マスターレーザーと一定の周波数差で同じ線幅に追随させ、もう一組の飽和吸収ロックや外部共振器を組む必要がなくなる。本実験は周波数変調による 6.8GHz サイドバンドへの光注入同期によるリポンプ光源の開発を目的としている。

2.原理

2.1 サイドバンド

レーザー光にサイドバンドを立てるためには LD に流す電流に対して交流電圧をかけ、周波数変調を行う必要がある(図1)。印加する変調周波数によってレーザーはいくつかの周波数成分を持ち、変調信号の振幅に依存して、搬送波の両脇のサイドバンドの強度を制御できる。

変調された光の波動関数 v_c はベッセル関数を含む形で書け、そのスペクトルを見るとサイドバンドが立っている。 V_c は搬送波の電場、 ω_c は搬送波の角周波数、 ω_m は変調信号の角周波数、 m は変調指数を示す。

$$v_c = V_c [J_0(m) \sin \omega_c t - J_1(m) (\cos(\omega_c + \omega_m) t + \cos(\omega_c - \omega_m) t) - J_2(m) (\sin(\omega_c + 2\omega_m) t + \sin(\omega_c - 2\omega_m) t) + \dots]$$

今回用いる条件は、サイドバンド強度が搬送波の 10%以下であり、レーザーは主に搬送波周波数、+1次、-1次の3つの周波数を持っている。

2.2 光注入同期

光注入同期は広い線幅を持つレーザーに周波数の決定した狭い線幅の光を注入することで、引き込み現象によって周波数が同期し、狭線幅で発振するようになる(図2)。半導体レーザーの自走状態では一般に広い波長帯で発振している。ここに周波数 ω_0 の狭い線幅のレーザーを入射することによって周波数 ω_0 の光に対応する誘導遷移確率が圧倒的に大きくなる。この結果、光注入された半導体レーザーの発振周波数の同期及び光の増幅が生じる。本実験では ω_0 をクーリング光の周波数とし、スレーブレーザーのサイドバンドへの光注入同期を目指す。

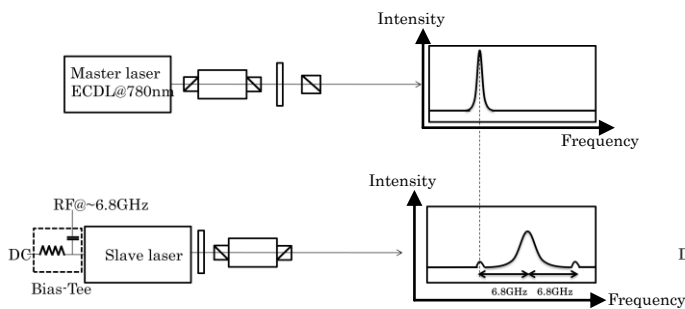


図 1 : 6.8GHz電流変調によるサイドバンド

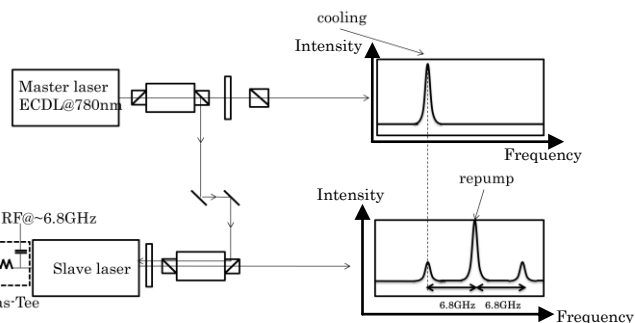


図 2 : 6.8GHzサイドバンドへの光注入同期

3.実験

マスターレーザーは自作 ECDL を使用し、スレーブレーザーはレーザーダイオード M9 - 785 - 0150(thorlabs) を LDM21(thorlabs)にマウントして使用した (図 3)。

ECDL を 780.25nm で発振させ、 $|5S_{1/2} F=2\rangle \rightarrow |5P_{3/2} F'=2-3\rangle$ の飽和吸収ロックを行い、マスターレーザーの周波数を決定する。

Microwave oscillator によって 6.8GHz の周波数変調をしたスレーブレーザーのサイドバンド (-1 次) に対してマスターの光を光注入同期する。それによりスレーブレーザーを狭帯域化し確定した周波数の搬送波を持つリポンプ光としての利用が可能となる。

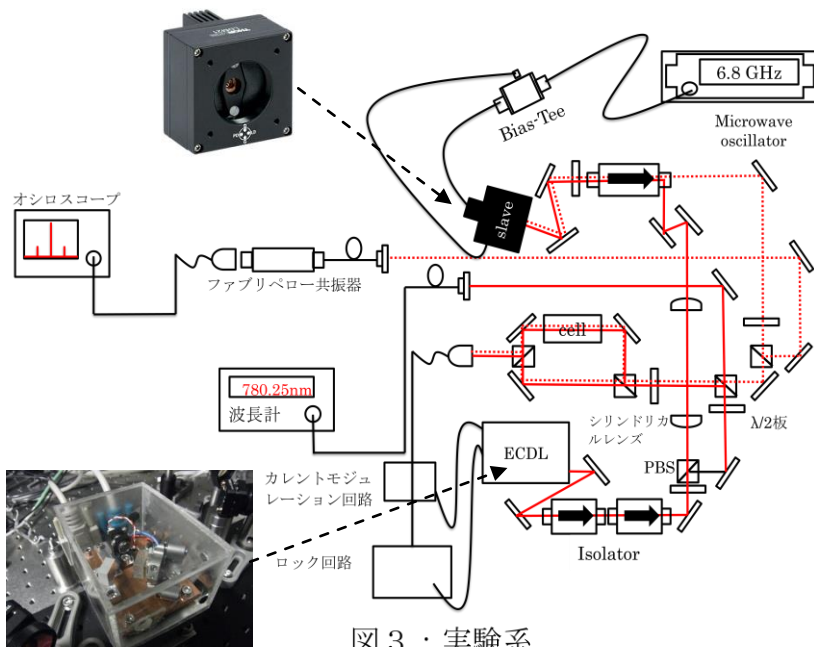


図 3 : 実験系

3.1 飽和吸収ロック

マスターレーザーの周波数を決定するために PDH 法を用いて飽和吸収ロックを行った。カレントモジュレーション回路でマスターレーザーに 15MHz のサイドバンドを立て、Rb cell を透過した probe 光を photo detector(PD)で検知する。

PD の AC 信号からカレントモジュレーション回路内のミキサーを介してエラー信号を取り出し、ロック回路を介して ECDL のグレーティング (PZT 圧電素子) にフィードバックする (図 4)。

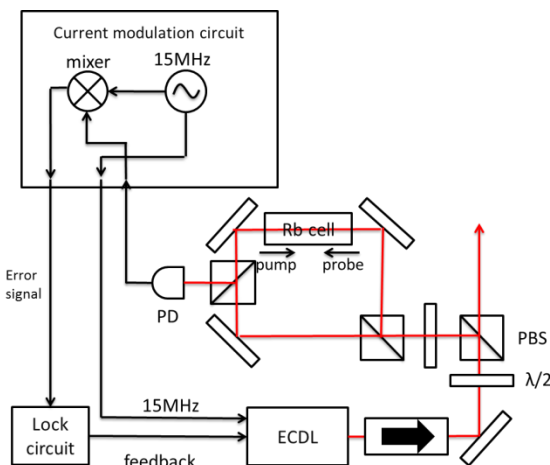


図 4 : 飽和吸収ロックシステム

3.2 Slave への電流変調(6.8GHz microwave)

スレーブレーザーにサイドバンドを立てる時、変調波 6.8GHz の高周波伝送ロスが大きな障害となり、本実験では現在の値(2%)のサイドバンドを立てるまでに様々な走査を行った。重要な点は高周波伝送ケーブルの選択と LD へのアクセスである。

Microwave oscillator(ROHDE & SCHWARZ SMB-100A Signal Generator)から Bias-Tee(ZX85-12G:Mini-Circuit)の RF 端子までのケーブルは TestLINE18 を使用した。将来的には microwave oscillator を VCO に置き換えることを予定している。

LD マウント(LDM21)の内部構造は図 5(解体図)のようになっている。

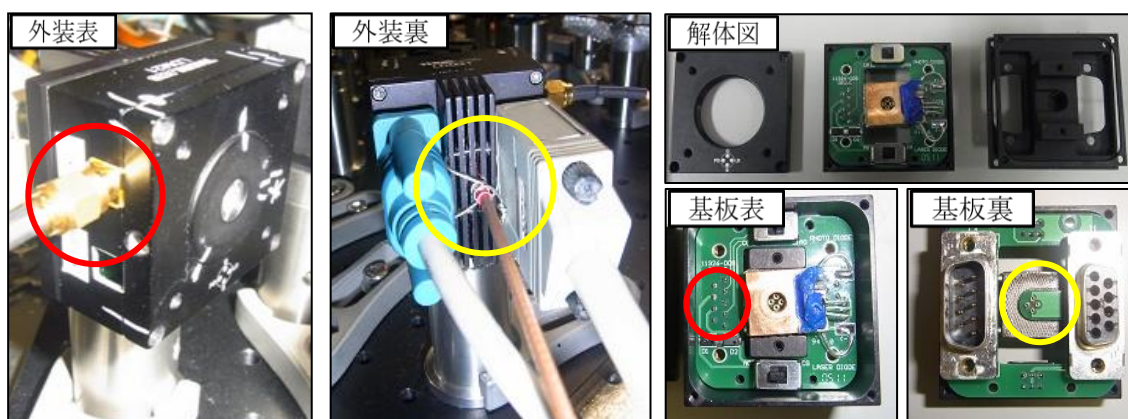


図 5 : slave laser (LDM21) 各図

DC 成分は従来の回路基板の DC line(LD 電流入力)を切断し、基板表の回路 (図 5 : 基板表、赤い円) にはんだ付けし、DC line を外装の外 (図 5 : 外装表、赤い円) に逃がした。そこから Bias-Tee の DC input に入力し、Bias-Tee の RF 端子からの 6.8GHz によって電流変調された電流が LD に入力される。

備え付けの LD 保護回路、あるいは回路基板そのものでの高周波ロスを回避する必要があるため、基板裏の黄色い円で示した部分 (図 5 : 基板裏、黄色い円) を切除することによって回路基板と LD を切り離した。それにより外装裏にあけた穴 (図 5 : 外装裏、黄色い円) から Bias-Tee の RF+DC を直接 LD の足にアクセスすることができる (図 6)。

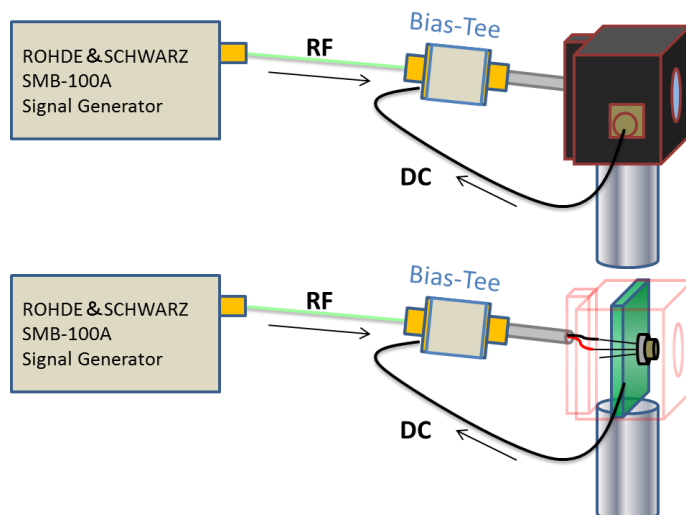


図 6 : スレーブ 電流変調システム

4.実験結果

図7に示すのは Bias-Tee への入力 microwave が 25dBm の時キャリア（搬送波）に対して average2%のサイドバンドである（光注入同期は行っていない）。この値は非常に小さく、FSR が 1GHz のファブリペロー共振器の透過光を PD で検出した後、増幅回路で信号を増幅した。オシロスコープ上でサイドバンドは時間によって ±1%程度の強度不安定性があり、average 機能によって平均値をとった。RF を LD current にかける際の高周波ロスによって、今回は 25dBm で Average 2%のサイドバンドが限界であった。Microwave power 19~25dBm でのキャリアに対する sideband のパーセンテージを図8に示す。

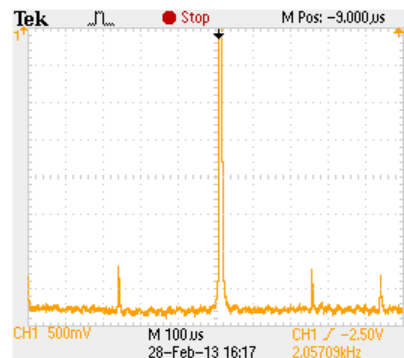


図7：サイドバンド

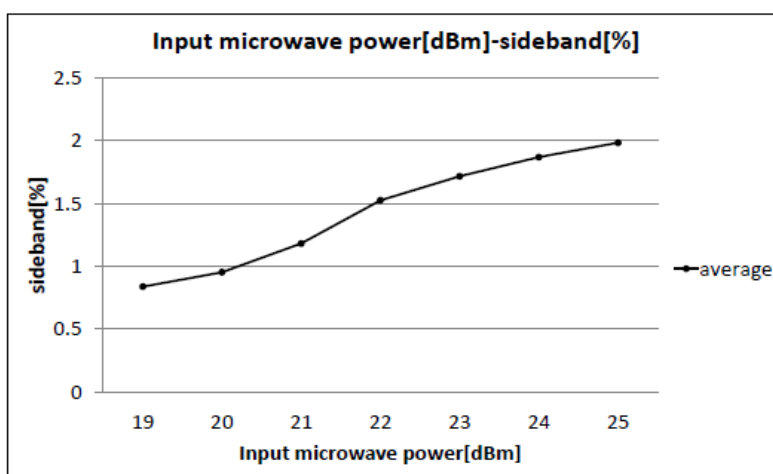


図8：Input microwave power [dBm]-sideband [%]

参考論文[1]によれば 852nm の Cs 原子冷却光源では、microwave power 15dBm でキャリアに対して 5%のサイドバンドが立っている。また、5%のサイドバンドに対して 80 μ W のパワーで光注入同期を行っている。我々の実験結果においては 2%のサイドバンドに対して 80 μ W 以上の光注入同期が必要と考え、50 μ W ~ 1.5mW の光注入同期を行った。マスターからの光注入同期パワーの増大によって、サイドバンドの大きさに由来するインジェクションロッキングレンジの狭さをカバーし、スレーブがマスターの周波数に対してより追従しやすくなることを予想した。結果はスレーブのキャリア周波数がマスター周波数に同期することは確認できたが、サイドバンドのマスター周波数への引き込みを観測するには至らなかった。これはサイドバンドが極端に小さい事が原因で、ファブリペローでスペクトルを見ながらスレーブの周波数を振ったところ、サイドバンドに引き込みが起こる様子はなく常にキャリアに引き込まれる結果となった。また、microwave、注入同期パワーのこれ以上の増加は LD の安全のために行わなかった。サイドバンドのパーセンテージに関して、伝送効率の上昇に向けて高周波ロスの少ないケーブルを用いるなど様々な走査を行ったが、LD そのものでのインピーダンスマッチングや反射波による伝送電力の低下なども考えられ、今後改善の余地があると考えられる。

参考文献

- [1]Wenting Diao et al., Optics Express.20,7480 (2012)
- [2] 寺田裕之 農工大、修士論文(2012)
- [3]M. J. Snadden et al., Opt. Lett. 22(12), 892-894 (1997)
- [4]W. L. Chen et al., Opt. Lett. 33, 357-359 (2008)