

^{87}Rb 原子の $5S_{1/2} - 6P_{1/2}$ 遷移によるレーザー冷却

へ向けた光源の開発

先端工学基礎課程 学籍番号 1124013

岸本研究室 伊藤 勝造

1. 背景と目的

^{87}Rb 原子はアルカリ希土類と呼ばれ、周期表の左端に位置する。そして閉殻を原子核とみなせば、原子核と電子1つという水素原子と同様の単純な構造を持つ原子であり、レーザー冷却においてもその構造を把握・利用する事で多くの成果が上げられている。レーザー冷却とは原子による光の吸収と放出のサイクルを利用し、室温原子を数 $100\mu\text{K}$ 以下にまで冷却する事である。しかし原子は、原子固有のエネルギー準位間のエネルギーを持つ光のみを吸収する。よって冷却には同じエネルギーを持つ光、つまりは同じ波長を持つ光が必要になる。以上の理由から、レーザー冷却には冷却に利用するエネルギー準位間のエネルギーに合致する波長のレーザーが必須である。我々の研究室においても ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ 、 $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ 、2つの遷移を用いた冷却を実現している。そして現在、同原子の $5S_{1/2} - 6P_{1/2}$ 遷移を使った冷却を計画しており、新たな光源の開発が求められている。

レーザーと一口に言うが、市販の LD 半導体を購入すれば直ぐに使えると言うものではなく、LD 半導体の外部に共振器を付けて回折光を選択し波長を安定化させた外部共振器型半導体レーザー (ECDL) として使用する事が多い。しかし、共振器長の変化は光の波長を大きく変えてしまうため、ECDL を構築するだけでは求める安定性は得られない。よって、波長のズレを検出し共振器長のフィードバック制御を行い波長を安定化する。なお、共振器長のフィードバックはフィードバックに使用する圧電素子 (PZT) にちなんで PZT フィードバックと呼ばれている。PZT フィードバックに加え、一般に半導体 LD の波長は駆動電流によっても変化するため駆動電流にフィードバック制御を行い2パラメータによる波長安定化も広く行われている。

波長安定以前に波長の同定が必要だが、手法の一つに飽和吸収分光[1]がある。上記のフィードバックにも利用する PZT に連続的に電圧を印加し、波長を連続的に変化させる波長掃引が実現できる。そして、共鳴準位が存在する波長近傍では、光の吸収量が波長ごとに変化するため、特徴ある波形 (ディップ、クロスオーバー) が観測できる。また、これらのディップやクロスオーバーの出現する周波数は準位のデータ[2]から算出できるので、これらの特徴点の出現した電圧を維持し、波長同定が可能になる。

以上は主に PZT の操作による ECDL の波長安定化について述べた。しかし、使用予定のレーザー光源モジュールは、ECDL の構成をした既製品となっているが、上述した PZT フィードバックなどの、レーザー冷却の用途に見合った波長安定化機構が含まれていない。よ

って、このモジュールを用いて波長安定化 ECDL を開発する場合、電流による波長の掃引、同定、電流によるフィードバックのみしか行えない。電流フィードバックは良く知られた手法で障害は少ない。しかし、LD 波長には温度特性があると同時に、LD 温度には電流特性がある。このため、電流による波長掃引時に温度ゆらぎが増大し、波長同定を困難にする可能性がある。よって、本研究では想定される掃引時の温度ゆらぎを避けるために、掃引電流の与え方を工夫した方法による ECDL の波長安定化技術の開発を目指している。

2. 電流掃引信号のアイデア

従来の波長掃引は PZT に印加する電圧を三角波にする事で実行されている。PZT の LD 駆動温度に対する影響は小さく、温度ゆらぎは低く抑えられる (図 1、(A)、60ms は当研究室での三角波の周期)。一方、電流で同様の掃引を行うと、電流の LD 駆動温度への影響は大きく温度ゆらぎは PZT 掃引に対して増大する事が予想される。本研究では (C) の赤線で示される信号を発信し、以上の欠点の回避を試みる。(C) では電流掃引時間を短くし、温度ゆらぎが LD の波長に顕在化する前に掃引を終える。そして掃引後に顕在化した温度ゆらぎを、電流を一定値で維持する事で安定化させ、次ぎの掃引時の温度ゆらぎを抑える。

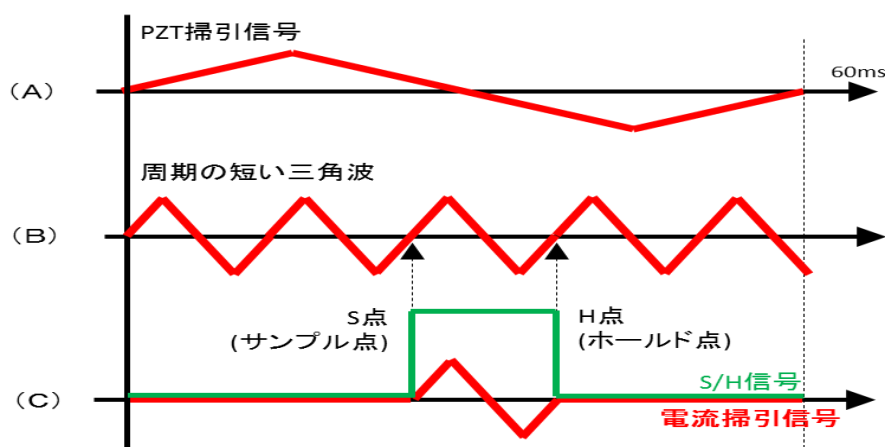


図 1：電流掃引信号のアイデア (縦軸：掃引信号強度、横軸：時間)

(C) の信号は、周期の短い三角波を発生し (B)、その一周を信号強度が 0 になるタイミングで抜き出し実現する。実際の回路ではサンプル点 (S 点) で三角波の抜き出しを開始し、ホールド点 (H 点) で抜き出しを止め信号強度を 0 に維持する。

3. 電流掃引信号発振回路

先に示したアイデアを実現するための回路が図 2 になる。(A) で周期の短い三角波 (S0) を発生し、(B) で (A) の三角波の 1 周期を抜き出しクロック信号 (S1) を生成している。また、実験に際しては、三角波の周期や、強度 0 に維持する時間の長さを任意に調整できるように、(A) の R13 と (C) のタイマー IC の時定数を変える VR2 を可変抵抗にした。

しかし、2つのパラメータは連動していないため、調整がなければ S/H (サンプル/ホールド) のタイミングはズレ、信号強度が 0 でない点でホールドを開始し、寧ろ温度ゆらぎが増加する可能性がある。この S/H ミスを自動的に解消するロジックとして (C) があり、最終的には IC5 によって、(A) からの三角波が (C) からの S/H 信号 (S5) のタイミングで抜き出され、電流掃引信号 (S6) が発振される。

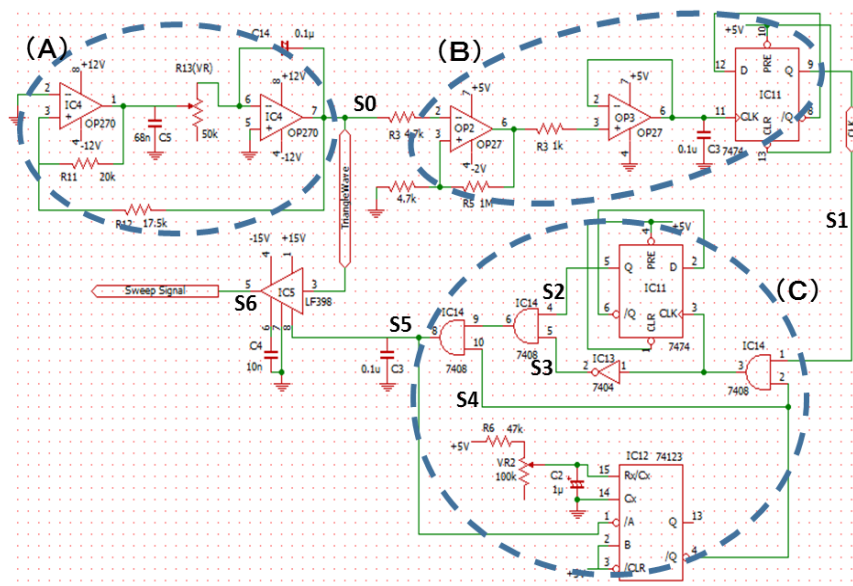


図 2 : 電流掃引信号発振回路

図 3 は (C) のロジックを回路シュミレータした結果である。S1 はクロック信号で、矩形の間隔は三角波の 1 周期に合致し、high、low の切り替わるタイミングは丁度、三角波の強度が 0 になる点になっている。よって、S/H 信号 (S5) としては、S1 1 山を等間隔で抜き出せれば良い。S/H 信号は S2、S3、S4 の論理積から生成される、また S/H 信号をタイマー IC にフィードバックする事で強度 0 の時間を一定に保っている。可変抵抗によるパラメータの変更で S3 に見られる様なタイミングの不一致が発生するが、上記の論理積がこれを吸収している。

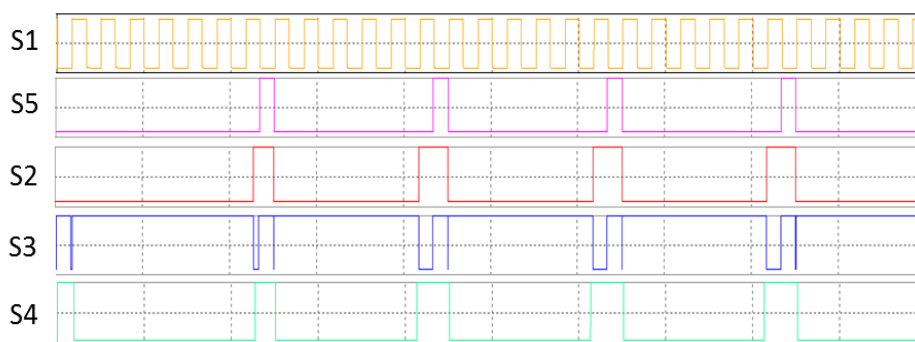


図 3 : 論理部 (C) の回路シュミレーション結果

4. 電流掃引信号発振回路による波長掃引

回路の動作確認を行うため、現在安定稼動中の 780nm のレーザーを用い電流による波長掃引を試みた。780nm レーザーにて飽和吸収の微分信号が確認できる電圧と電流のバイアスをそれぞれ PZT と電流コントローラーにて固定した後、電流コントローラーの MOD IN から掃引信号の電圧を入力、電流コントローラーにより電圧は電流に変換され、LD 駆動電流を掃引した。結果、波長の同定・安定化に必要な微分信号が確認できた。図 3 では周期的に掃引が行われている事がわかる。図 4 を見ると微分信号の左右の非対称性から掃引後の微分信号にはわずかなゆらぎが見える一方、掃引前の微分信号にはゆらぎが無く、ホールド期間に温度ゆらぎが消えた可能性がある。また、微分信号が大きくクリアに見えており、少なくとも電流掃引が PZT 掃引に劣るもので無いと判断できる。(黄：S/H 信号、青：電流掃引信号、緑：吸収信号、赤：微分信号)

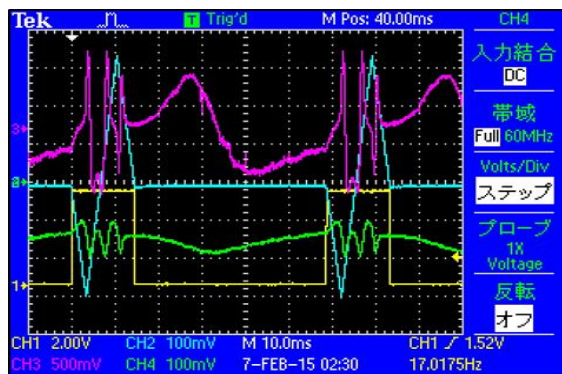


図 3

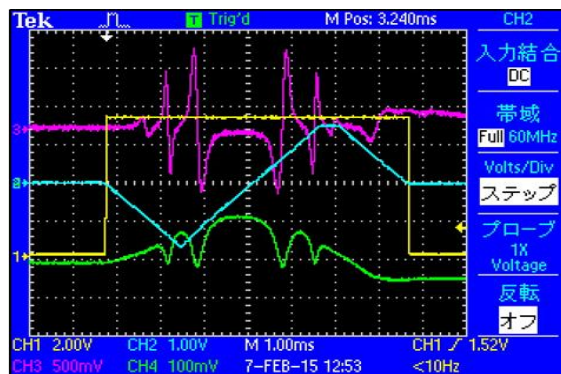


図 4

5. まとめ・今後の展望

今回、電流掃引のみによって 80MHz 程度の範囲内で飽和吸収信号を観測できることが確認できた。今後、掃引信号の振幅を拡大することで、500MHz 程度の掃引帯域を得たいと考えている。その後、この回路を市販の 420nm ECDL に適用し、さらに電流フィードバック回路、温度コントローラーを組み込み、電流駆動のみによる狭線幅波長安定化 ECDL を構築する。そして、この光源を用いて ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2} - 6P_{1/2}$ 遷移を用いた D1 gray-molasses を行い、 $5S_{1/2} - 6P_{3/2}$ 遷移の Doppler 冷却限界を超える原子の冷却と高密度化を目指す。

6. 参考文献

- [1] Doppler-free saturated absorption spectroscopy: Laser spectroscopy, Advanced Optics Laboratory
- [2] <http://www.pmp.uni-hannover.de/cgi-bin/ssi/test/kurucz/sekur.html>