

準安定状態ヘリウム飽和吸収セルの製作

量子・物質工学科 清水研究室 増永 祐紀

研究の背景・目的

清水研究室では主に希ガス原子のレーザー冷却による磁気光学トラップ (MOT) 生成の研究を行っている。そこで本研究では、準安定状態ヘリウム飽和吸収セルの製作によりその閉じた遷移である 3S1-3P2 遷移にレーザーの周波数を安定にロックすることを目的とする。

実験の原理及び手順

原理その 1 : 「飽和吸収分光法」

ヘリウム原子の冷却遷移にレーザー光の周波数を安定にロックする為には、原子の吸収スペクトルを得る必要がある。しかし、常温にて原子は熱運動を行っており、吸収線はドップラー効果により拡がり (300K の He 原子で約 5GHz)、自然幅は埋もれてしまう (He* 原子の 3P2 で 1.6MHz)。このためドップラーフリーの吸収線を得る一つの方法が「飽和吸収分光法」である。

飽和光強度の速度分布の様子を図 1 の (1) ~ (3) に示す。

飽和吸収分光法の説明にあたって単純な 2 準位原子を考え、その遷移周波数を ω_0 、レーザーの周波数を ω 、その差を $\delta = \omega - \omega_0$ 、レーザーの波数を k 、レーザーの入射された軸を x 軸とする。まず放電セルに 1 本目の十分な強度の光 (pump 光) が入射されると、レーザーの離調 δ がドップラーシフトで補償される範囲の原子のみが励起され、下準位の速度分布に穴が開く (図 1 (1))。セルを通過し、折り返されることにより再びセルに入射された光 (probe 光) は、励起された原子に吸収されないため、図 1 (2) のように吸収線に dip が生じる。

折り返して光を入射した場合、 $\delta = 0$ つまり $v_x = 0$ の原子が共鳴するときこのような状態が起こり、ドップラーフリーの吸収線を得ることができる (図 1 (3))。

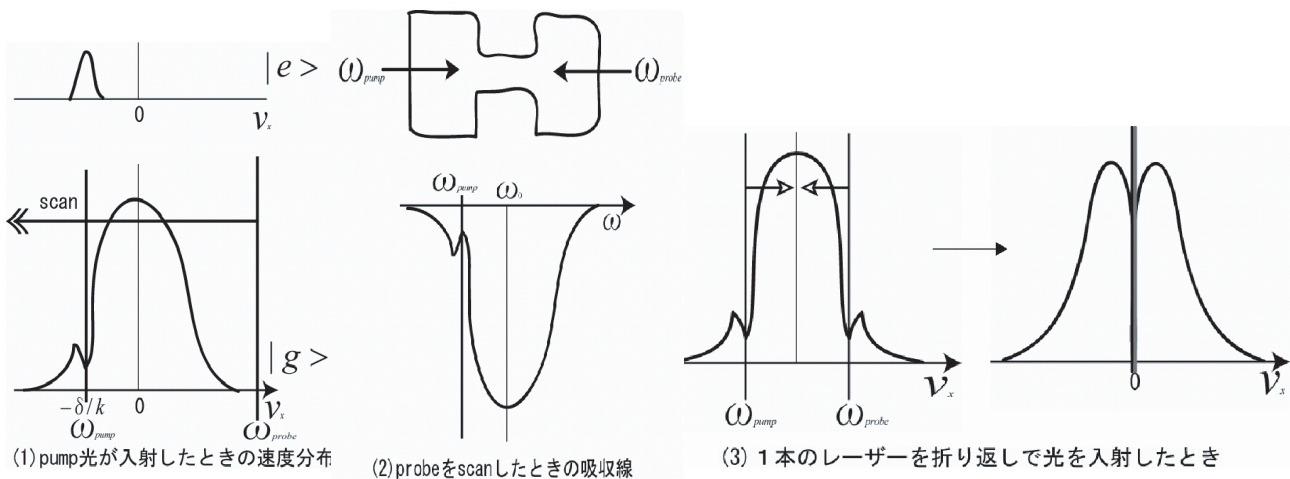


図 1: 飽和吸収分光法の原理

原理その 2 : 「周波数ロックの方法」

飽和吸収分光を行うための放電セルには 1torr の圧力でヘリウムガスが封入されており、その陰極は放電により放出されるプラスイオンがセルのガラス壁に当たることで不純物をたたき出すのを防ぐ為に大きく設計されている。セルの電極に ~3kV の電圧をかけることで ~150 μ A で DC 放電させ、セル内のヘリウム原子を準安定状態に励起している。

またセルの括れ部分にはコイルが巻かれており、そこに AC 電流を流すことで原子のエネルギー準位に変調が掛けられるようになっている。さらに、放電セル全体を囲むような配置で固定されたパイプに巻かれたコイルに DC 電流を流すことにより一様な静磁場をつくり、ゼーマンシフトを利用してロックする周波数をシフトし、必要な

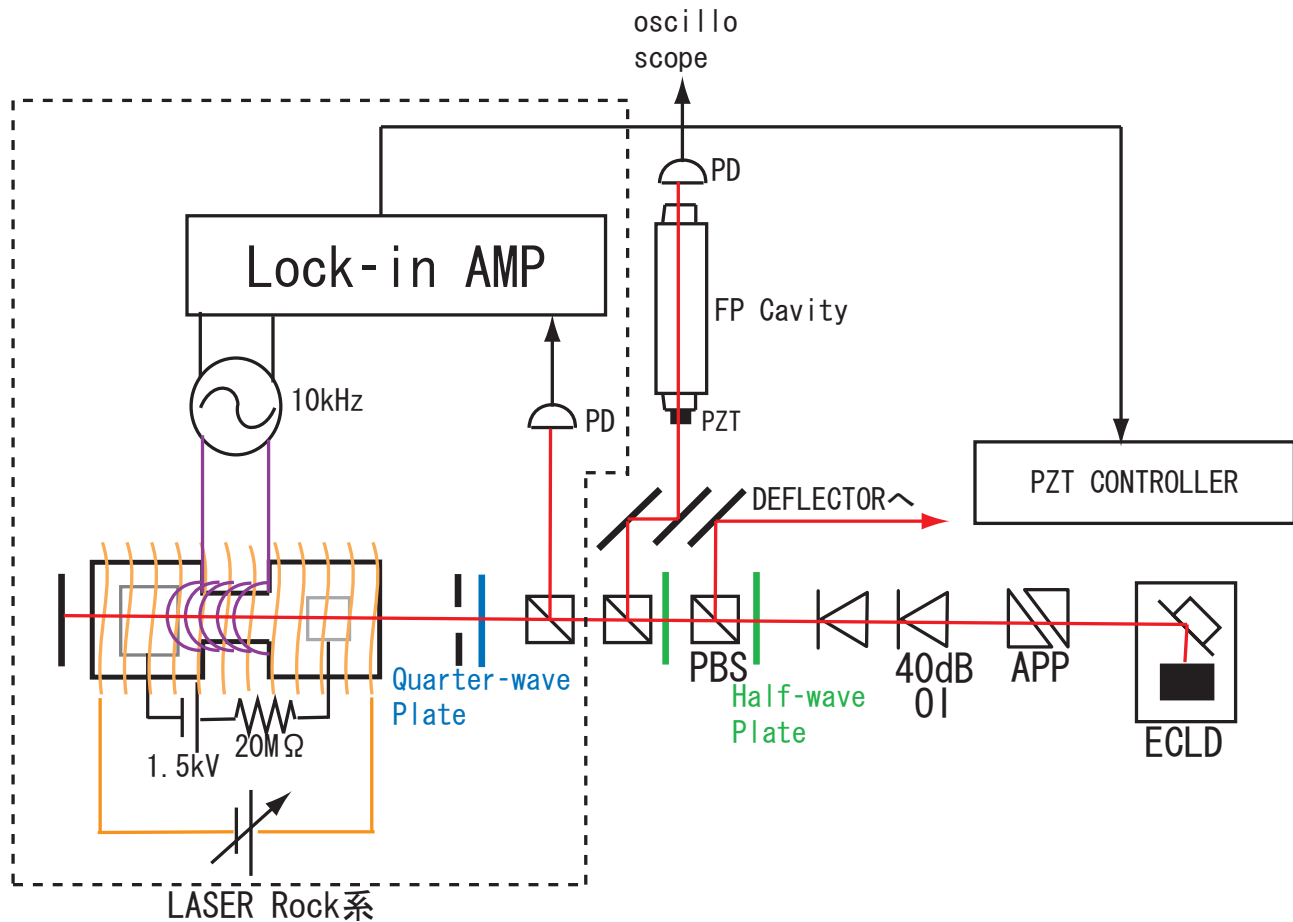


図 2: 周波数ロックの光学系

レーザーの離調 (~ 3 MHz) を得ている。

手順その 1 : 「周波数ロックの手順」 まず、PZT ドライバにあるスイッチをスキャンにしてドライバから三角波を発生させ、外部共振器型半導体レーザーのグレーティング微調用の PZT を駆動することでレーザーの周波数を掃引する。ロックインアンプからの出力信号をオシロスコープで観測し、PZT ドライバから出力する電圧のオフセットを変えることで掃引の中心波長を変化させ 3S1-3P2 の飽和吸収信号を探す。信号が見つかったら、PZT ドライバから出力する三角波の振幅を小さくすることでレーザーの波長の掃引範囲を狭くしていく。飽和吸収の微分信号が十分大きく確認できたら PZT ドライバのスイッチをロックに切り替え周波数のスキャンを停止し、信号を PZT にフィードバックさせてレーザー光の周波数を冷却遷移にロックする。周波数ロックの光学系を図 2 に示した。

10kHz 変調用発振器の製作

飽和吸収信号を得るためには、放電セル内の準安定状態ヘリウムガスの閉じた遷移である 3S1-3P2 遷移エネルギーに変調を掛ける必要があり、変調用発振器を秋月電子通商「MAX038 使用広帯域精密波形オシレータキット」により製作した。

発振される変調信号の周波数は 0.1Hz ~ 20MHz の範囲で動作し、ポテンショメータによりおよそ 10KHz に調節した。また発振器は 50 Ω でドライブ可能であり、このことは変調用セルのインピーダンス (34.6 Ω (表 2)) とのバランスが取れているために セルに必要な電圧がきちんと掛けられることを示している。

電源は ± 5V を必要とし、これはイーター電機工業製スイッチング電源「BJS24FWA-U」を用いて、その + 5V / + 12V 出力のうち、+12V 出力に使用されていた 7912 タイプ三端子レギュレータを基盤上で 7905 タイプにはんだ付けし直すことによって得た。

周波数カウンタの製作

また、まるでファンクションジェネレータのように変調信号の発振周波数を常時確認できることを目指して「1 Hz 単位で4桁または5桁の表示」「上位5桁の精度」を持つ周波数カウンタを製作した。まず、周波数カウンタとするためには

- a. 外部クロックを入力し、基準となる時間を作る
- b. 周波数信号を取り込み、カウントする
- c. カウント結果を液晶モジュールにて表示する

の3ステップが必要であり、そのために20MHz仕様のマイクロコントローラ「PIC16F84A」及びLCDモジュール「SC1602BSLB」を使用した。その回路図を図3に、周波数表示の様子を図4に示す。

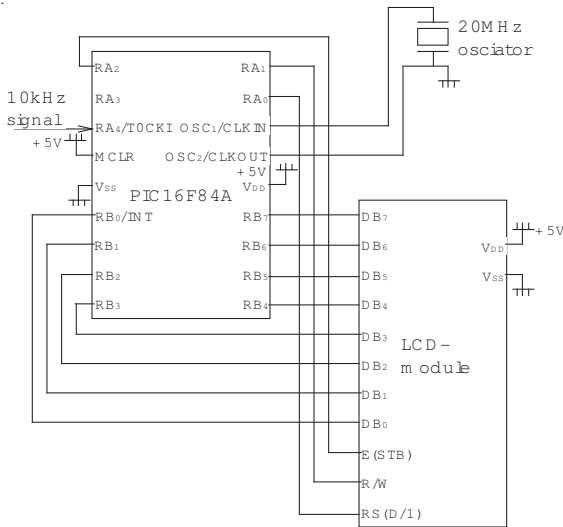


図3 周波数カウンタ回路図

図4 周波数表示の様子

次にプログラムの作成について説明する。20MHz外部クロックはマイクロコントローラ(以下マイコン)内部で4分周され、0.2 μ secが1命令ステップにより作り出されている。したがって、例えば1sec数えるには1/0.2 μ sec=5,000,000ステップの命令を必要とする(a)。周波数信号をカウントするには、間隔1.0secの周波数信号をTMR0レジスタで数えあげ、カウント値をバイナリから10進数へ変換、液晶モジュールに表示という流れを繰り返し行っている(b、c)。プログラムにより作り出されたこの一連の流れを表1に示す。

表1: カウントプログラムの流れ

動作	詳細	所要時間
初期化	ポートの条件設定、液晶表示器の初期化	12.9msec
	↓	
スイッチ状態の入力	ゲート時間、プリスケアラ有無、帯域指定 ↓(繰り返しここから)	7.2 μ sec
周波数測定	1.0secの間TMR0でカウント	1.0sec
	↓	
バイナリからBCDに変換	3バイトを10進8桁に変換	0.75msec
	↓	
液晶に表示	8桁 ゼロサプレスも同時に実行	0.22msec
	↓	
	繰り返しへ	

飽和吸収セルの製作

- ヘリウム放電セルを光学台上に安定に固定するため、アクリル板に加工を施すことによりセルホルダを製作した。この際、セル電極・AC コイル・DC コイルの各導線はセルホルダ下部に固定した BNC コネクタに繋ぐ事で実験の際に光学台上で各信号コードの付け外し操作を容易に行えるようにした。
- ヘリウム放電セル中央の括れ部分にコイルを巻き、ヘリウム原子の冷却遷移エネルギーに 10kHz 変調を掛けるための発振器に接続した。作製したコイルのデータは表 2 の通り。
- 放電セル全幅を包み込むようにコイルを巻き、DC 電流を流して静磁場を作り出すことでゼーマンシフトを利用してロックする周波数の離調を得られる。実際にはこのコイルは AC コイルの上から (直に) 巻きつけたのではなく、図 5 右に示した塩ビのパイプ上に巻き付けており、これを図 5 左のセルホルダに (写真上で) 横方向からスライド挿入してホルダの円盤部分と固定されるように設計した。

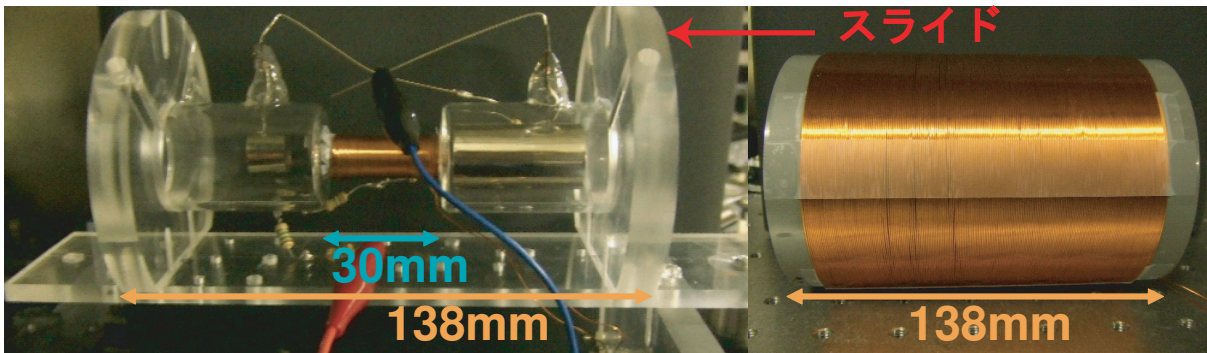


図 5 ヘリウム放電セルとコイル

また、製作した 2 種類のコイルの各データは表 2 のようになった。

表 2: 変調用および離調用コイルのデータ

	コイル内径 [mm]	コイル横幅 [mm]	銅線太さ [mm]	層/巻き数 [回/巻き]	銅線長さ [m]	銅線抵抗 [Ω]
AC	8	30	0.30	6/510	15.3	3.71
DC	85	120	0.50	2/440	117.5	10.3
AC 50mA で 10 ガウスの設計 ⇒ $n = 1.70 \times 10^4$ [巻/m](実際) ⇒ $L = 5.5 \times 10^{-4}$ [H] ⇒ 34.6 [Ω]						
DC = -3MHz の設計 ⇒ $n = 3.67 \times 10^3$ [巻/m](実際)、コイル 7.4mA						

結果・考察および今後の展望

放電セルがリークしてしまい、ヘリウムの放電を見ることができなかった。原因としては セルの電極と導線を接続する際にはんだ付けを行ったがゆえに、電極とガラス管の接着部分に瞬間的に大電圧がかかり剥離してしまったことが考えられる。DC コイルと AC コイルは分離されており、次回のコイル作製はひとまず AC 電源用のみ行えばよい。

以上を踏まえて今後の研究として、別の放電セルを製作して飽和吸収信号の確認を行うことが必要である。